XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
Geotecnia e Desenvolvimento Urbano
COBRAMSEG 2018 – 28 de Agosto a 01 de Setembro, Salvador, Bahia, Brasil
©ABMS, 2018

Evaluación de Espectros de Respuesta mediante el Análisis Unidimensional de Respuesta de Sitio en la Ciudad de Lima

Jorge Soto Huamán
Universidad de Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, josotoh@uni.pe

Jorge E. Alva Hurtado
Universidad de Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, jalvah@uni.edu.pe

Carmen E. Ortiz Salas
Universidad de Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, cortiz@uni.edu.pe

RESUMEN: En este trabajo se presentan los espectros de respuesta obtenidos en siete distritos de Lima, mediante el análisis de respuesta de sitio unidimensional en el dominio de las frecuencias y del tiempo. Estos espectros obtenidos se compararon con los espectros de la norma sismo resistente E-030. De los resultados obtenidos se observa que para suelos rígidos, intermedios y flexibles, las aceleraciones máximas obtenidas son de 0.50g, 0.55g y 0.60g respectivamente y los valores de amplificación de aceleración del suelo encontrados son de 1.10, 1.20, y 1.30. Los factores de amplificación sísmica obtenidos son superiores a 2.5.

Palabras Clave: Espectro de respuesta, amplificación sísmica, propagación de ondas.

1 INTRODUCCIÓN

El espectro de respuesta de aceleración (Sa) es uno de los parámetros utilizados con mayor frecuencia en ingeniería sísmica para el diseño sismo resistente. El espectro de respuesta se puede obtener mediante el registro sísmico, el estudio de peligro sísmico y el análisis de respuesta de sitio. En este artículo se usará el análisis de respuesta de sitio unidimensional en el dominio de frecuencias y en el dominio del tiempo, considerando el comportamiento del suelo lineal y no lineal equivalente respectivamente.

2 METODOLOGÍA

Cuando ocurre un evento sísmico a distancias lejanas del sitio, en el interior de la tierra ocurre la propagación de ondas sísmicas (Onda P y Onda S), siendo la más importante, convencionalmente, la onda S (componente SH) la que produce un movimiento horizontal que potencialmente puede causar daños. Para el análisis de este trabajo se consideró la propagación vertical de las ondas SH a través del depósito de suelo (Figura 1). La ecuación de la propagación vertical de onda SH es:

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

2.1 Método lineal equivalente

Este método considera el comportamiento de cada estrato como resorte-amortiguamiento en configuración paralela, es decir, usa el modelo Kelvin-Voigst con lo cual la ecuación de propagación vertical se convierte en:

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

©ABMS, 2018

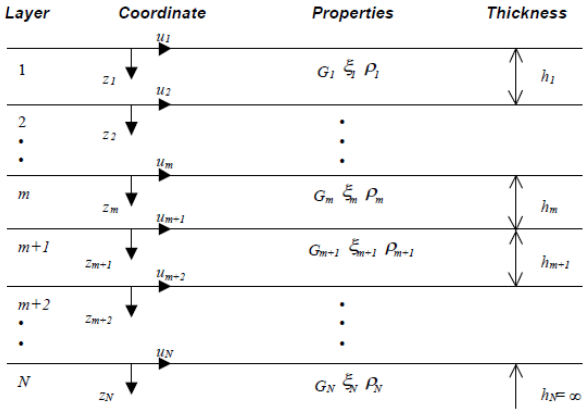


Figura 1. Propagación vertical de ondas SH a través del suelo

Siendo "ρ" la densidad del suelo, "G" módulo de rigidez, "η" la viscosidad y "u" el desplazamiento del medio; este último parámetro depende de la posición (z) y el tiempo (t).

La solución de la ecuación (2) es la siguiente:

$$u_n(z,t) = A_n e^{ik^* z} + B_n e^{-ik^* z} \qquad (3)$$

Esta solución es usada en los programas de cómputo EERA y DEEPSOIL desarrollados por Bardet (2000) y Hashashah (2004) respectivamente.

2.2 Método no lineal

Este método analiza la respuesta no lineal del depósito de un suelo, usando la integración numérica directa, en pequeños incrementos de tiempo del modelo esfuerzo-deformación no lineal del suelo. Para este método, el depósito de suelo estratificado horizontalmente es discreto en masas concentradas y se expresa por la siguiente ecuación (Bardet 2001, Hashash et al 2004):

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = [M]\{I\}\ddot{u} \qquad (4)$$

Donde [M] es la matriz de masas, [C] es la matriz de amortiguamiento, [K] es la matriz de rigidez, {ü} vector de aceleración nodal, {ü} vector de velocidad relativa nodal, {u} vector de desplazamiento relativo nodal, {üg} aceleración en la base. La ecuación de equilibrio dinámico es resuelta numéricamente para cada incremento del tiempo usando el método β de Newmark. Para este trabajo se usará el programa de cómputo DEEPSOIL (Hashash, 2010).

3. CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DEL SUELO DE LIMA.

La ciudad de Lima se encuentra asentada sobre depósitos aluviales pleistocénicos (Qpl-al), depositos aluviales recientes (Qh-al) y depósitos eólicos pleistocénicos (Qpl-e). Las características geotécnicas de estos depósitos han sido estudiadas por diferentes instituciones e investigadores como el CISMID (APESEG 1994-2005), D. Calderón (2012), S. Quispe et al. (2014) entre otros.

Los perfiles de velocidad de onda de corte (Vs) se obtuvieron mediante ensayos sísmicos tales como los ensayos MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), MAM (Microtremor Array Measurement) y SPAC (Spatial Autocorrelation). La combinación de estos métodos permitió obtener perfiles sísmicos hasta 400m de profundidad (Calderón, 2012, 2014), a esta profundidad se estima que se ubica la formación rocosa del centro de la ciudad de Lima (Arce, 1984).

La curva de reducción de módulo y la curva de amortiguamiento se estimaron considerando las propiedades índices de los estratos y la presión de confinamiento a diferentes profundidades (Soto, 2016).

Con la información recopilada se obtuvieron siete perfiles geotécnicos, para los distritos de La Punta-El Callao (DHN), Bellavista (CMA), La Molina (MOL1,MOL2,MOL), Villa El Salvador (VSV), El Rímac (CSM), Cercado de Lima (PQR) y San Isidro (CDL), todos estos distritos pertenecen a la ciudad de Lima. En la Figura 2 se muestra la ubicación de estos perfiles. En la Figuras 3y 4 se muestran dos de los perfiles usados para el análisis de respuesta de sitio.

©ABMS, 2018

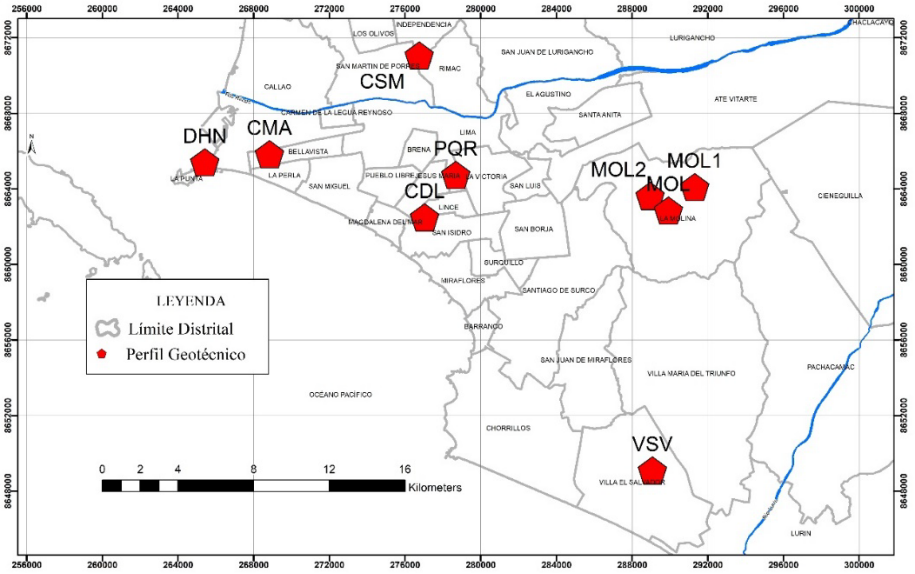
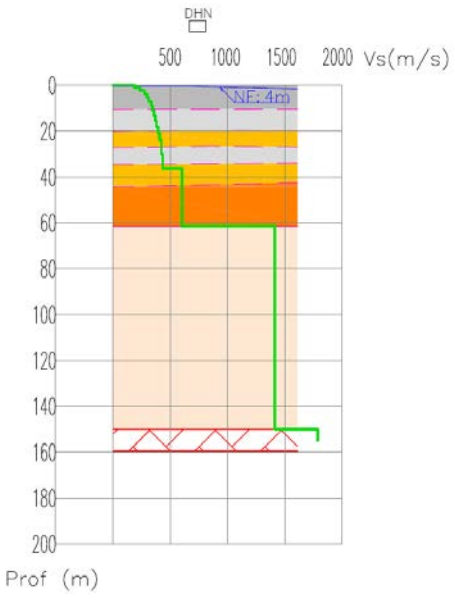


Figura 2. Ubicación de los perfiles geotécnicos



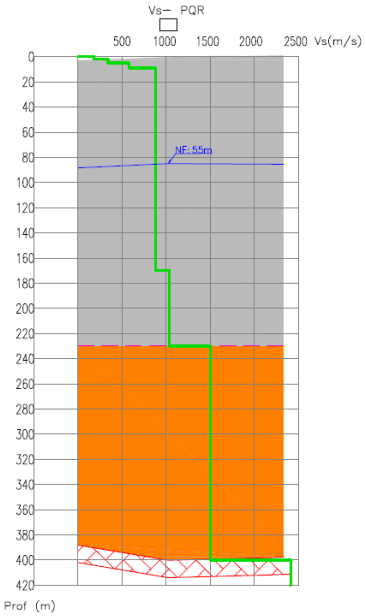


Figura 3. Perfil del Callao (DHN). Figura 4. Perifl del Cercado de Lima (PQR)

4. SISMO DE ENTRADA

Para realizar el análisis de la respuesta de sitio, es necesario conocer un movimiento sísmico en la base del depósito de suelo, para lo cual se generó un acelerograma sintético mediante el método de ajuste espectral (Lilhanand y Tseng 1988), a partir de un espectro de peligro uniforme (EPU).

El EPU se obtuvo de un análisis de peligro sísmico siguiendo la metodología de Ordaz et al. (2007) y Wang (2007). Se utilizaron fuentes sísmicas de subducción y continentales propuestas por Gamarra y Aguilar (2009); los parámetros de recurrencia sísmica utilizados fueron los propuestos por Alva y Escalaya (2005). Asimismo se ha considerado las coordenadas geográficas de la estación PQR, debido a que representa el valor promedio para los perfiles de análisis.

©ABMS, 2018

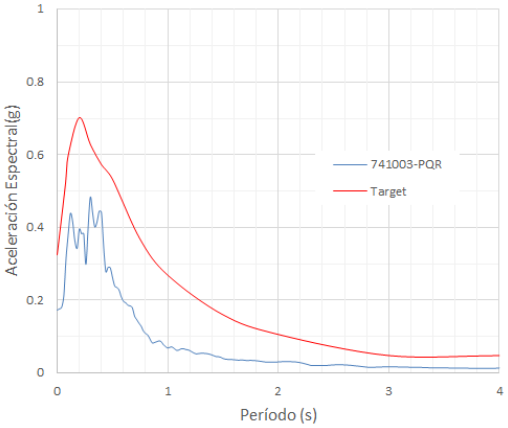


Figura 5. EPU y espectro del sismo 1974

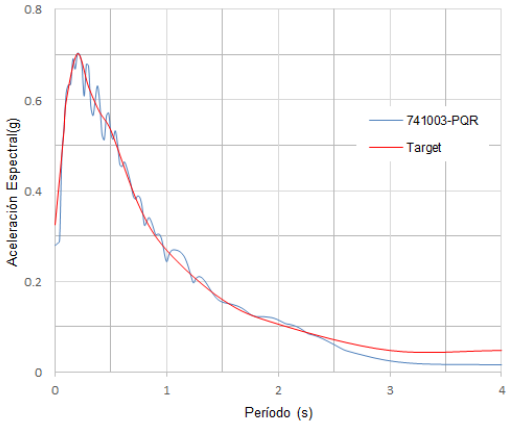


Figura 6. Espectro ajustado al EPU

El acelerograma sintético se obtuvo usando el algoritmo de Al Atik y Abrahamson (2009) y el registro del sismo de Lima de 1974, el que se modificó en función del contenido de frecuencias. En la Figura 5 se muestra el espectro de peligro uniforme (EPU) y el espectro obtenido de la señal sìsmica; en la Figura 6 se muestra el espectro de respuesta original y el modificado por el método de ajuste espectral.

5. ANÁLISIS DE LA RESPUESTA DE SITIO DE LA CIUDAD DE LIMA

Al realizar los análisis en el dominio del tiempo y en el dominio de las frecuencias, es decir, análisis no lineal y lineal equivalente respectivamente, se verificó que el nivel de deformación cortante en todo el perfil es muy similar en ambos análisis. Los resultados del movimiento se obtuvieron en términos del espectro de aceleración para cada uno de los perfiles (Figuras de 7a a 7i) obteniéndose los valores de aceleraciones espectrales máximas, el periodo correspondiente y el rango de periodos correspondientes a 1.5 veces del valor de la PGA, los que se presentan en la Tabla N°1. Los análisis fueron desarrollados utilizando los programas de cómputo DEEPSOIL, NERA y EERA.

Tabla 1. Aceleración espectral máxima, período de vibración

Perfil	DEEPSOIL			NERA			EERA		
	(g)	(s)	Rango 1.5PGA (s)	(g)	(s)	Rango 1.5PGA (s)	(g)	(s)	Rango 1.5PGA (s)
CMA	1.48	0.29	0.21-0.64	1.53	0.28	0.21-0.62	1.77	0.39	0.25-0.66
DHN	1.49	0.23	0.10-0.92	1.42	0.23	0.10-0.78	1.61	0.64	0.22-0.80
PQR	2.25	0.10	0.07-0.23	1.68	0.09	0.05-0.18	1.09	0.12	0.08-0.08
MOL1	2.03	0.11	0.06-0.57	1.80	0.15	0.10-0.48	1.84	0.17	0.10-0.57
MOL2	2.19	0.29	0.13-0.73	2.48	0.28	0.11-0.26	2.95	0.28	0.12-0.56
MOL	2.03	0.11	0.08-0.50	1.80	0.15	0.10-0.50	1.84	0.17	0.10-0.56
CSM	2.6	0.29	0.13-0.73	2.48	0.28	0.11-0.26	2.95	0.28	0.12-0.56
CDL	1.21	0.09	0.08-1.14	0.99	0.23	0.10-0.37	1.01	0.21	0.12-0.40
VSV	2.07	0.20	0.10-0.20	2.22	0.13	0.10-0.33	2.68	0.14	0.10-0.20

©ABMS, 2018

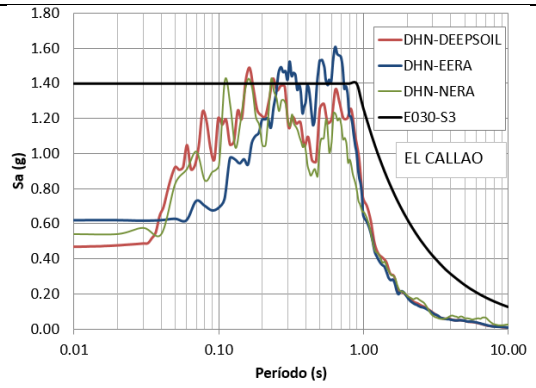


Figura 7a

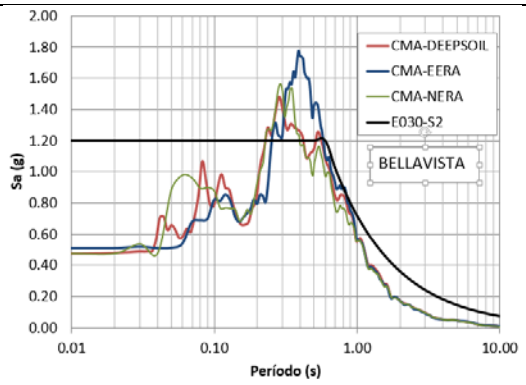


Figura 7b

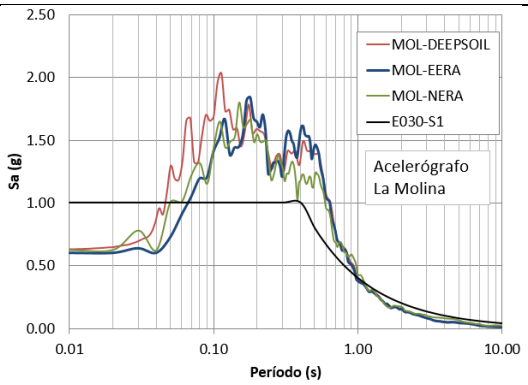


Figura 7c

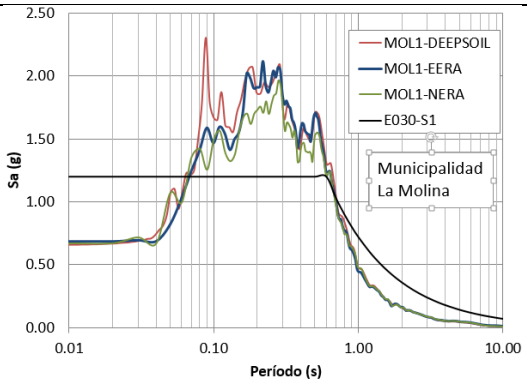


Figura 7d

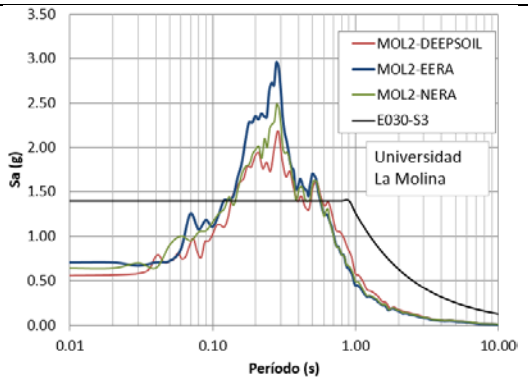


Figura 7e

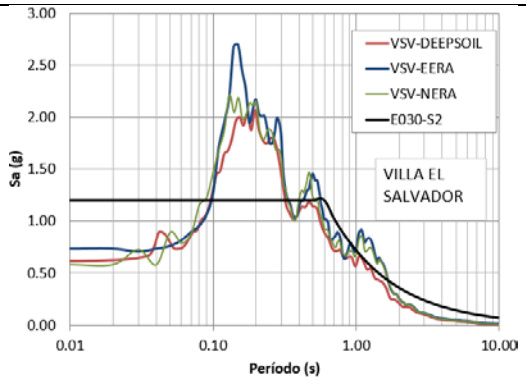


Figura 7f

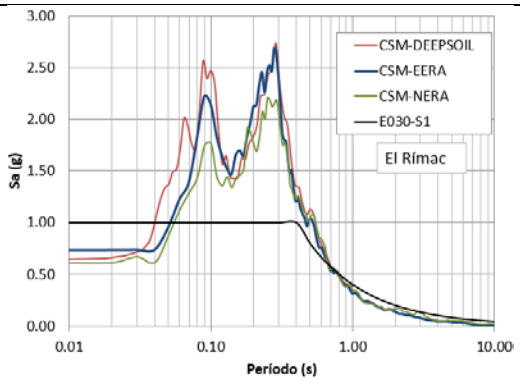


Figura 7g

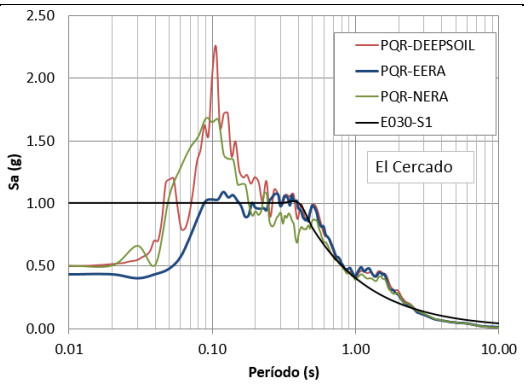


Figura 7h

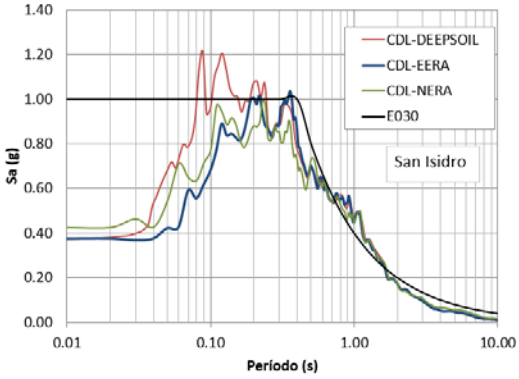


Figura 7i. Espectro de aceleración en la superficie de cada perfil

De los espectros de respuesta obtenidos se observa que:

- La aceleración espectral máxima es de 2.74g para un período de 0.29s, este valor corresponde al perfil CSM del distrito del Rimac (análisis no lineal).
- Las amplitudes del espectro de respuesta obtenidas en el análisis no lineal, no necesariamente son superiores a las obtenidas en el análisis lineal equivalente, debido al nivel de deformación obtenido en la superficie y al modelo del comportamiento del suelo.
- Las formas espectrales obtenidas en cada perfil mediante el análisis LE y NL son similares, con excepción del perfil PQR.

Asimismo se ha clasificado los perfiles del suelo en base a la norma sismo resistente E030 obteniéndose los perfiles de: suelo rígido (CMA, MOL, CSM, PQR, CDL), suelo intermedio (VSV) y suelo flexible (DHN).

Por tanto, la aceleración máxima promedio del terreno para los suelos rígidos, suelos intermedios y suelos flexibles es de 0.5g, 0.55g y 0.60g respectivamente; además la amplificación del suelo es 1.10, 1.20 y 1.30 respectivamente.

Asi mismo se compararon los espectros de respuesta de sitio con los espectros de respuesta obtenidos con los lineamientos de la norma E-030. Los parámetros usados fueron Z=0.45, U=1 y S=1.0, 1.05, 1.10 para suelo rigido, intermedio y flexible respectivamente, estos espectros de respuesta fueron normalizados y comparados con el factor de amplificación sísmica. (Figuras de 8a a 8i) .

©ABMS, 2018

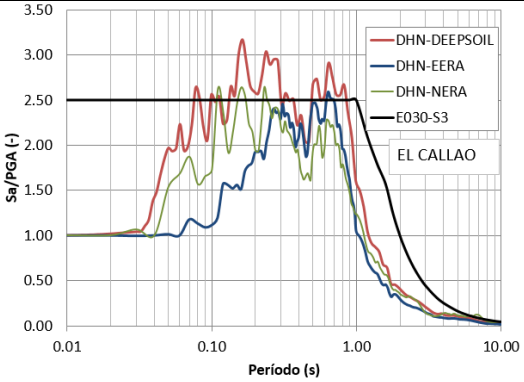


Figura 8a

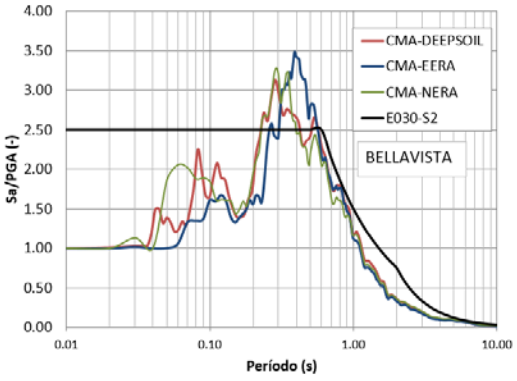


Figura 8b

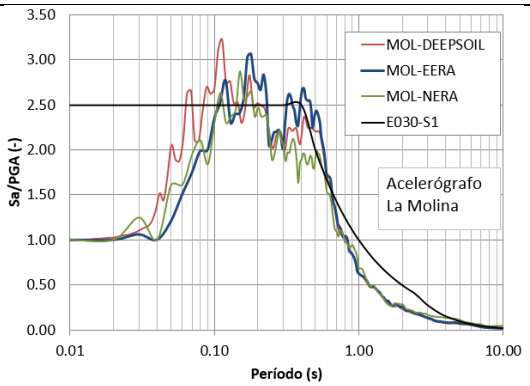


Figura 8c

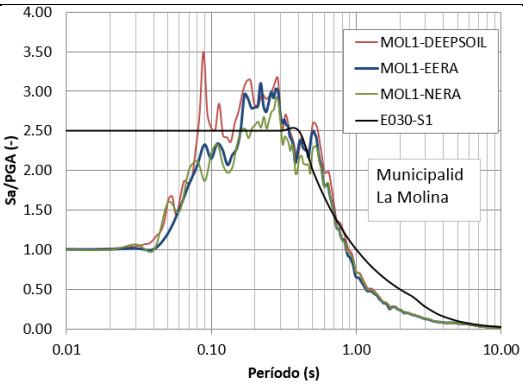


Figura 8d

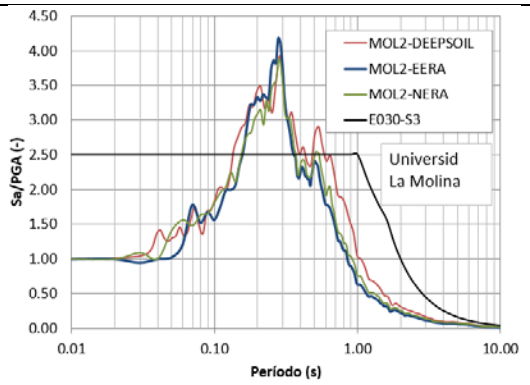


Figura 8e

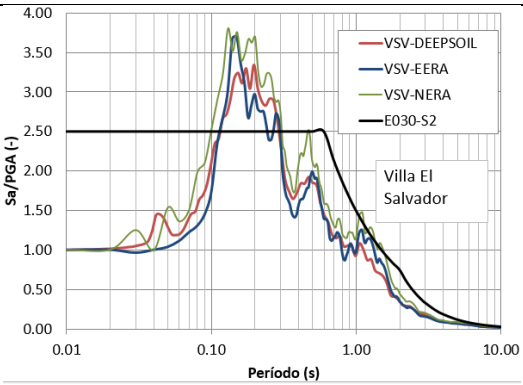


Figura 8f

©ABMS, 2018

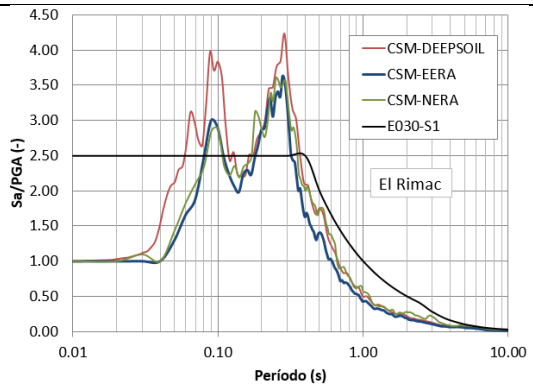


Figura 8g

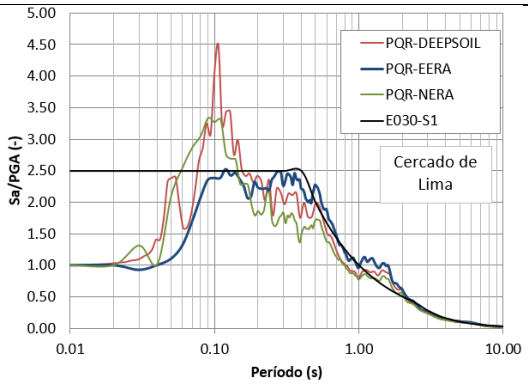


Figura8h

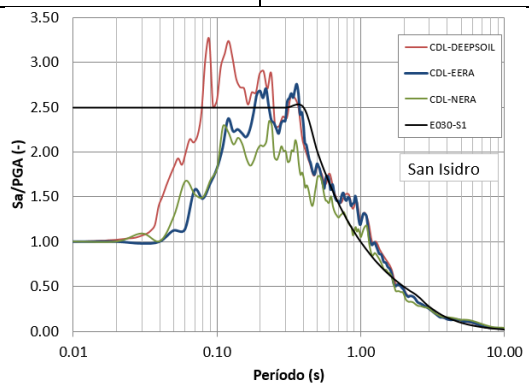


Figura 8i. Comparación de espectros de respuesta de sitio y espectros de la E030

De la comparación se aprecia que:

- Para los suelos rígidos, las amplitudes de los espectros de respuesta de sitio normalizados son superiores a los espectros (factor de amplificación) obtenidos con la norma E030, en el rango de periodos que define la plataforma espectral, es decir el tramo recto, con excepción del perfil CDL (San Isidro).
- Para los suelos intermedios, las amplitudes de la respuesta de sitio normalizados, son superiores a los espectros obtenidos con la norma E030, en el rango de periodos que define la plataforma espectral
- Para suelos flexibles, las amplitudes de respuesta de sitio normalizado, son muy superiores al espectro (factor de amplificación) obtenido con la norma E030.

Por tanto, mediante la evaluación de los espectros de respuesta de aceleración, los suelos rígidos, intermedios y flexibles tienen un factor de amplificación sísmica (C) superior a 2.5 en el rango que define la plataforma espectral.

CONCLUSIONES

- Se realizó el análisis de respuesta de sitio en la ciudad de Lima en el dominio de frecuencias y en el dominio del tiempo. Por lo tanto, los resultados de estos análisis corresponden sólo a la ciudad de Lima.
- Las amplitudes del espectro de respuesta obtenidas en el análisis no lineal, no necesariamente son superiores a las obtenidas en el análisis lineal equivalente,

©ABMS, 2018

debido al nivel de deformación obtenido en la superficie y al modelo del comportamiento del suelo

- Con los resultados de respuesta de sitio se obtuvieron amplificaciones del suelo de 1.1, 1.2 y 1.3 para los suelos rígido, intermedio y flexible respectivamente.
- De la comparación entre los espectros de respuesta de sitio y los espectros de respuesta de la norma peruana E030, se pudo observar que el factor de amplificación sísmica es superior a 2.5.

REFERENCIAS

Al Atik L., Abrahamson N. (2001) “An improved method for Non-Stationary Spectral Matching". Earthquake Spectra, Volume 26, No. 3, pages 601–617.

Arce J. (1984), “Estructura Geoeléctrica del subsuelo Rímac-Chillón”. Sociedad Geológica del Perú. Volumen Jubilar LX Aniversario. Lima, Perú.

Bardet J., Tobita T. (2001) "A Computer Program for Nonlinear Earthquake Site Response Analyses of Layered Soil Deposits", University of Southern California. Department of Civil Enginnering.

Calderón D. (2012) "Estimación de Velocidad de Ondas de Corte Profundas en Lima Perú, Usando Arreglo De Sismómetros". Journal of Disaster Research Vol.8.No2. Japan.

Gamarra C. (2009) “Nuevas fuentes sismogénicas para la evaluación del peligro sísmico y generación de espectros de peligro uniforme en el Perú”. Tesis de grado. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.

Hashash Y., Park D. (2004),"Soil damping formulation in nonlinear time domain site response analysis," Journal of Earthquake Engineering, Vol. 8, No. 2, pp 249-274.

Hashash Y., Phillips C., Groholski D. (2010),"Recent advances in Non-linear Site Response Analysis". Fifth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics". San Diego, California.

Lilhanand, K. and Tseng W. S., (1988). “Development and application of realistic earthquake time histories compatible with multiple damping response spectra”, Ninth World Conf. Earthquake Engineering, Tokyo, Japan, Vol 2, 819-824.

Soto J. (2016). “Evaluación de espectros de respuesta mediante el análisis de repuesta de sitio unidimensional en siete distritos de Lima”. Tesis de grado. Universidad Nacional de Ingenieria. Lima Perú

Wang, Z. (2007) “Understanding Seismic Hazard and Risk Assessments: A gap between engineers and seismologist”

Towhata I. (2008) "Geotechnical Earthquake Engineering". Ed. Prentice Hall. New Jersey. USA.