

PROPUESTA DE DEMANDA SÍSMICA CONTINUA PARA CÓDIGOS: ALEJÁNDONOS DE V_{S30} ¹

Gonzalo A. Montalva², Fabián Soto³ y Adrian Rodriguez-Marek⁴

Resumen: En este artículo se discuten las falencias de un sistema de diseño sísmico basado en una clasificación discreta de la amplificación de sitio. Se muestra que el promedio de velocidades de onda de corte en los primeros 30 metros es un buen estimador de la amplificación de sitio pero no para todos los periodos espectrales. Es interesante notar que para periodos bajos, la amplificación está mejor correlacionada con promedios de velocidad de onda de corte más superficiales, es decir, con menos información obtenemos mejores resultados. Finalmente, se presenta una propuesta preliminar para utilizar distintos promedios de velocidad de onda de corte en la amplificación de sitio. Esta metodología evita que para dos sitios con ligeras diferencias, puedan considerarse demandas significativamente diferentes, con efectos deseables en seguridad y economía.

Palabras clave: espectros de pseudoaceleración, respuesta de sitio, velocidad de onda de corte, V_{S30} .

DRIFTING AWAY FROM V_{S30} : A PROPOSAL USING CONTINUOUS V_S MEASURES FOR BUILDING CODES

Abstract: Most current building codes use average shear wave velocity over the upper 30 m as a parameter for classifying sites into discrete site classes. This paper discusses cases in which the use of discrete classes can be problematic. In addition, this paper demonstrates that site response at some periods is better correlated to the average shear wave velocity over depths other than 30 m. In particular, for short periods, amplification correlates better with average shear velocity over shorter depths, which implies that better results are obtained with less information. This paper presents a proposal to use continuous measures of average shear wave velocity over period-dependent depths to determine seismic amplification factors for use in seismic codes. This methodology avoids the pitfall that two sites with slight differences in average shear wave velocity might be designed for drastically different seismic demands.

Keywords: shear wave velocity, site response, spectral acceleration, V_{S30} .

INTRODUCCIÓN

Los recientes sismos de Chile (2010), Nueva Zelanda (2010) y Japón (2011), han generado preocupación en la comunidad ingenieril latinoamericana. La necesidad de mejorar nuestros códigos de diseño sísmico, incorporando los avances de la ciencia y las lecciones de los mencionados sismos, ha quedado en evidencia.

La norma sísmica chilena, al igual que la mayoría de las normas sísmicas del mundo, basa la demanda sobre estructuras en espectros de pseudoaceleración. La inclusión del efecto de sitio en la mayoría de las normas del mundo se realiza clasificando sitios, por sus propiedades dinámicas, en cuatro clases distintas. Esta metodología permite que distintas estructuras emplazadas a pocos metros de distancia sean diseñadas utilizando demandas sísmicas muy diferentes. Lo anterior no es consistente con el estado del arte en respuesta de sitio, es potencialmente inseguro como se indicará más adelante, y además es poco económico.

¹ Artículo recibido el 7 de setiembre de 2011 como parte del 2do Encuentro Latino de Profesores de Geotecnia. Artículo aceptado en versión final el 15 de noviembre de 2011.

² Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción, Casilla 160-C, Concepción, Chile. E-mail: gmontalva@udec.cl

³ Estudiante de pregrado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción. E-mail: fasoto@udec.cl

⁴ Profesor Asociado, Civil and Environmental Engineering, Virginia Tech, Blacksburg, VA, USA. E-mail: adrianrm@vt.edu

En el trabajo de Borcherdt (1994) encontramos la génesis del sistema de clasificación del International Building Code (IBC, 2006) ó la Norma Chilena Oficial NCh 433 (NCh 433 Of. 96, 2009). Borcherdt encontró una relación entre el promedio de la velocidad de onda de corte en los primeros 30 metros, V_{S30} , y la amplificación de sitio. De acuerdo con esto propuso una metodología, para modificar el espectro de respuesta en roca a otro en suelo con distintas rigideces, asociadas a V_{S30} .

Diversos investigadores (por ej., Castellaro et al. 2008; Hartzell et al., 2003) han encontrado que V_{S30} parece ser un parámetro insuficiente para modelar la respuesta de sitio. Sin embargo, la mayoría de los códigos actuales (IBC, NCh433, Eurocode), lo utilizan como parámetro fundamental para la asignación de espectros de pseudoaceleración.

Este artículo presenta una propuesta preliminar para utilizar distintos promedios de velocidad de onda de corte, no solamente V_{S30} , en la modificación continua de un espectro para roca por efecto de respuesta de sitio. Esta metodología permite una transición continua entre sitios con distintas velocidades de propagación de onda de corte. Adicionalmente, utilizando la base de datos de KiK-net (Kiban-Kyoshin, 2011), se muestra que promedios de velocidades de onda de corte distintos a V_{S30} son mejores estimadores de la amplificación de sitio.

MOTIVACIONES PARA EL CAMBIO

Efectos de una demanda sísmica discreta

Las diferencias entre las demandas sísmicas prescritas por los códigos actuales son en muchos casos significativas. La Figura 1 muestra las diferencias entre espectros elásticos, que serán modificados para considerar ductilidad manteniendo las diferencias porcentuales, para sitios en la misma zona sísmica, con el mismo espectro de diseño para roca y con diferencias en V_{S30} que pueden ser tan pequeñas como un metro por segundo.

Estas diferencias se traducen en diferencias importantes en los costos de las estructuras. Desde esta perspectiva, un sistema de clasificación de sitios es en esencia anti-económico, pues sobrestima la demanda para aproximadamente la mitad de los sitios (ver las Figuras 4 y 5 en Borcherdt, 1994).

Desafortunadamente, estas diferencias también pueden producir una sub-estimación de la demanda sísmica. Esto se puede observar en las mismas figuras del trabajo de Borcherdt, o en evidencias del sismo del Maule de 2010 (por ej., GEER, 2010; Assimaki, 2012), donde dos edificios construidos utilizando el mismo código sísmico, a escasos metros de distancia fueron considerados en sitios II y III respectivamente (NCh 433 Of. 96). Esta diferencia produjo una disparidad en la demanda de diseño de hasta 100% en uno de los sentidos de un edificio (edificio no simétrico en planta). Este enorme cambio en la capacidad de la estructura puede haber contribuido a la falla del único edificio de altura colapsado durante este evento.

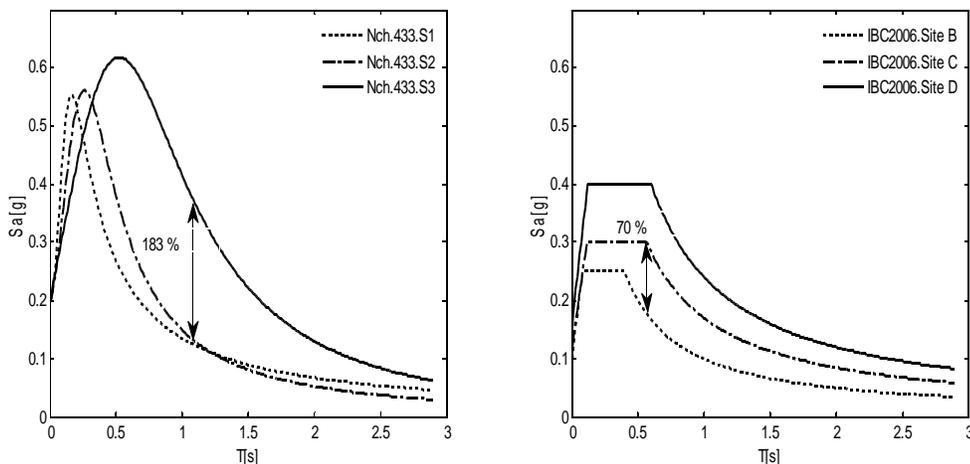


Figura 1: Diferencia de demanda sísmica para distintas clases de suelos: a) Nch. 433 Of. 1996 Zona 1 Suelos 1, 2 y 3; b) IBC 2006 para PGA = 0.1g Suelos B, C y D.

Efectos de utilizar un único parámetro como estimador de amplificación

La simplicidad en los códigos de diseño es una virtud ampliamente reconocida por la comunidad. Sin embargo, tal como lo han demostrado numerosas investigaciones (por ej., Castellaro et al. 2008; Hartzell et al. 2003), V_{S30} no es un estimador suficiente para modelar el complejo fenómeno de amplificación sísmica. Más aún, con la misma información (perfil de V_s hasta 30 metros), es posible lograr mejores estimaciones de amplificación de sitio.

EFFECTO DE SITIO Y SUS ESTIMADORES

La extensa red de acelerómetros de KiK-net (Kiban-Kyoshin, 2011) consta de instrumentos triaxiales en arreglos en superficie y en profundidad, generalmente llegando a roca. Estos sitios cuentan además con un perfil de V_s detallado. Los registros en la roca basal y en superficie permiten calcular empíricamente el efecto de sitio (o la función de transferencia entre la superficie y la roca basal). Asimismo, los perfiles de velocidad de onda de corte permiten evaluar la relación entre la respuesta de sitio y promedios de velocidad de onda de corte a distintas profundidades.

Dado el interés por caracterizar la respuesta de sitio durante eventos que puedan causar daño a las estructuras, los registros considerados en este trabajo son sólo los 8 sismos de mayor magnitud presentes en la base de datos de KiK-net. Estos últimos incluyen Tohoku 2011 de $M_w = 9.0$ y sus 3 principales réplicas.

Perfiles de velocidad de onda de corte en la base de datos de KiK-net

La Figura 2 muestra la distribución de perfiles en la base de datos de KiK-net. Se puede apreciar que ésta tiene una distribución de V_{S30} similar a otras bases de datos existentes y que no está sesgada hacia perfiles en un rango estrecho de valores. Un detalle significativo de esta base de datos es que tiene pocos perfiles con suelo blando.

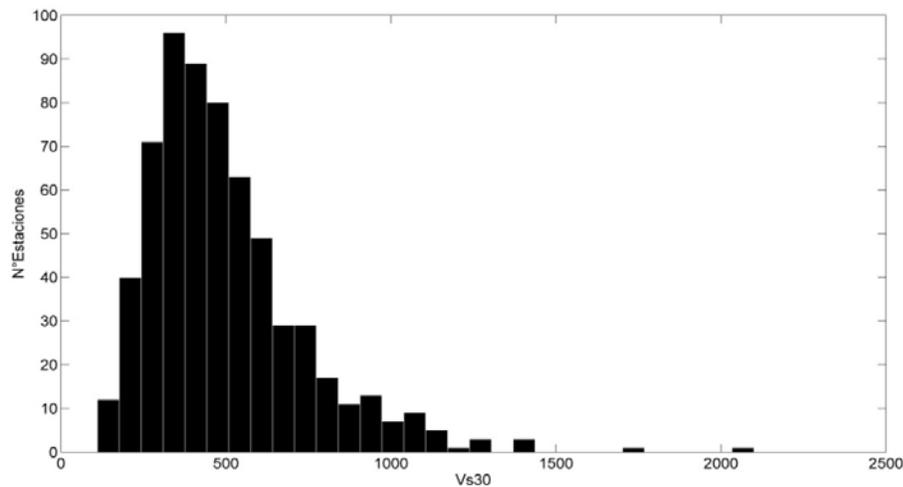


Figura 2: Histograma de 629 estaciones KiK-net según V_{S30} .

Correlaciones entre amplificación y velocidad de onda de corte.

Investigadores como Cadet y Duval (2009), Boore (2004) o Montalva y Rodríguez-Marek (2010) han establecido la estrecha relación entre la rigidez de depósitos de suelo superficial con las de capas más profundas. Esto implica que conociendo las velocidades en los metros superficiales es posible estimar, las velocidades a profundidades mayores (Montalva y Rodríguez-Marek, 2010). Esta evidencia, sumado al hecho que las longitudes de ondas varían con la frecuencia de dichas ondas, permite inferir que para frecuencias altas el promedio de velocidad de onda de corte que mejor estima la amplificación corresponderá a una profundidad menor que para frecuencias bajas con mayor longitud de onda.

La respuesta de sitio será evaluada mediante la razón de respuesta espectral (RRS), dada por la ecuación (1) para cada periodo (T) de cada registro.

$$RRS = S_{a,superficie}(T) / S_{a,roca-basal}(T) \quad (1)$$

La Figura 3 muestra tendencias lineales entre RRS y distintos promedios de Vs; en cada sub-figura se muestra el promedio de Vs que tiene mejor correlación con la amplificación. Es importante notar en esta figura, que tal como lo indicaría un análisis 1D de respuesta de sitio, no hay cambios bruscos en la amplificación. Es decir, frente a pequeños cambios de la estructura de velocidades, se observan cambios proporcionales en la respuesta de sitio.

Las correlaciones posibles entre Vs y RRS son negativas, pues a mayor Vs el perfil de suelo más rígido tendrá menor amplificación. La Tabla 1 muestra las correlaciones entre RRS y promedios de Vs para distintas profundidades. Se observa que para altas frecuencias (por ej., PGA) es el promedio (en el tiempo) para los cinco metros superficiales, Vs5, el que resulta el mejor predictor de la amplificación. Lo opuesto ocurre en bajas frecuencias, donde Vs50 ó incluso Vs100 (promedio en el tiempo para los primeros 100 metros) es el mejor predictor. Se debe notar que en promedio Vs30 es un buen estimador de amplificación, en el caso de usar sólo un parámetro para todos los periodos espectrales.

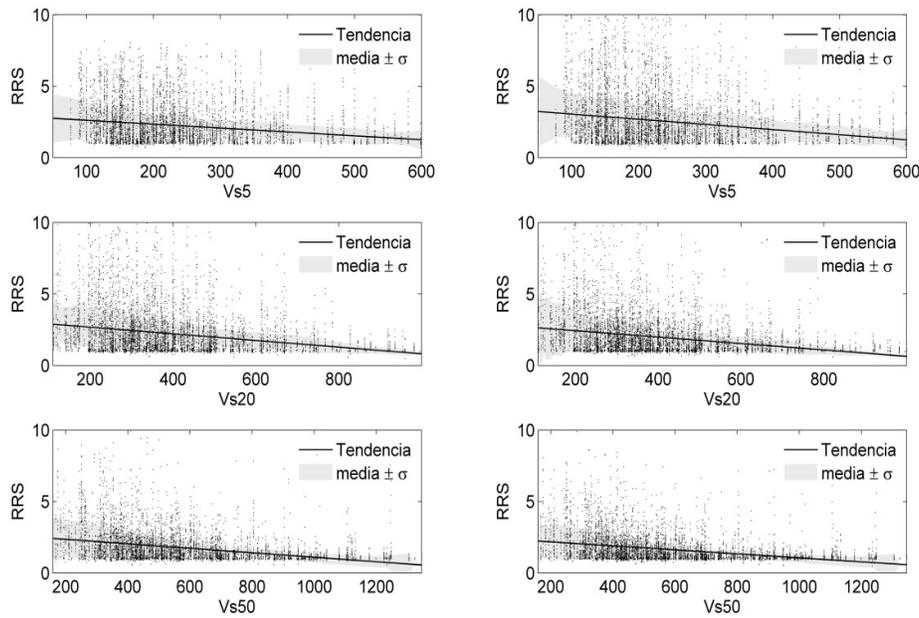


Figura 3: Tendencia RRS - Vs_x para distintos periodos de vibración: (a) T = 0 s.; (b) T = 0.2 s; (c) T = 0.5 s; (d) T = 0.6 s; (e) T = 0.8 s; (f) T = 1 s.

Tabla 1: Coeficientes de correlación para distintos promedios de Vs y distintos periodos espectrales T.

T / Vs _x	5	10	15	20	25	30	50	100
0	-0.2	-0.19	-0.2	-0.18	-0.18	-0.16	-0.14	-0.1
0.1	-0.16	-0.14	-0.13	-0.12	-0.12	-0.11	-0.07	-0.09
0.2	-0.19	-0.19	-0.19	-0.18	-0.18	-0.18	-0.15	-0.13
0.3	-0.21	-0.23	-0.23	-0.24	-0.23	-0.24	-0.22	-0.21
0.4	-0.19	-0.23	-0.24	-0.26	-0.26	-0.26	-0.26	-0.26
0.5	-0.2	-0.23	-0.25	-0.28	-0.28	-0.29	-0.3	-0.3
0.6	-0.2	-0.23	-0.26	-0.28	-0.29	-0.29	-0.32	-0.33
0.7	-0.21	-0.25	-0.28	-0.29	-0.31	-0.31	-0.33	-0.34
0.8	-0.19	-0.25	-0.27	-0.29	-0.31	-0.31	-0.33	-0.35
0.9	-0.19	-0.24	-0.27	-0.29	-0.3	-0.31	-0.33	-0.35
1	-0.19	-0.24	-0.26	-0.28	-0.3	-0.3	-0.33	-0.34
1.5	-0.16	-0.2	-0.24	-0.26	-0.28	-0.27	-0.3	-0.32
2	-0.13	-0.18	-0.21	-0.23	-0.25	-0.25	-0.27	-0.28

PROPUESTA

Proponemos utilizar los antecedentes expuestos para calcular la respuesta de sitio. Para poder hacer esto se deben modificar los factores de amplificación obtenidos de los valores medidos de RRS, pues éstos representan la amplificación desde la roca basal hasta la superficie. Esto difiere de los espectros para roca o suelo duro prescritos por los códigos, los que corresponden a roca superficial.

Para lograr lo anterior se filtran las estaciones clasificadas como suelo A y B de acuerdo al IBC 2006, es decir con un $V_{S30} > 760$ m/s. En este rango existen 55 estaciones, para las cuales se han analizado 195 registros. A modo simplificado, se ha determinado el RRS promedio correspondiente a cada periodo. Las amplificaciones obtenidas anteriormente se han dividido por la amplificación causada por la roca, para obtener datos comparables con las normativas.

La Tabla 2 muestra las ecuaciones que se propone utilizar para la modificación de un espectro en roca (considerada como $V_s > 760$ m/s) considerando estimadores mejores que V_{S30} . Dado que la base de datos considerada en este trabajo incluye sólo eventos de gran magnitud, el efecto de degradación de la amplificación no se ha considerado. El supuesto habitual de disminución de la amplificación con el aumento en PGA, hace suponer que los valores de amplificación estimados por la presente propuesta constituirían una cota inferior.

Una porción significativa de las estructuras construidas en Latinoamérica a base de muros de corte tienen periodos fundamentales por debajo de los 0.4 segundos, lo que significa que para todas esas estructuras la predicción del efecto de sitio con V_{S30} es menos eficaz.

Con el subconjunto de datos seleccionados en este trabajo, los mejores predictores de la respuesta de sitio para estructuras con periodos por sobre los 0.5 segundos son V_{S50} y V_{S100} . Utilizando otros grupos de datos, que incluyen sismos de menor magnitud, se encuentra que V_{S30} es el mejor estimador para un rango de periodos entre 0.5 y 0.7 segundos. Sin embargo, en esta propuesta se ha optado por excluir sismos de baja magnitud. En acuerdo con lo anterior, se recomienda utilizar V_{S50} como estimador para periodos superiores a 0.5 segundos.

Tabla 2: Ecuaciones para el factor de amplificación FA (V_{sx}), correspondientes a la mejor correlación para cada periodo T con su respectivo rango de validez.

Periodo [s]	x (V_{sx})	Ecuación FA	Rango de Validez
0.0	5	$2.89-0.0027V_{sx}$	[50, 600] m/s
0.1	5	$3.07-0.0024V_{sx}$	[50, 600] m/s
0.2	5	$3.41-0.0036V_{sx}$	[50, 600] m/s
0.3	20	$3.26-0.0023V_{sx}$	[110, 1100] m/s
0.4	20	$3.15-0.0023V_{sx}$	[110, 1100] m/s
0.5	50	$2.91-0.0016V_{sx}$	[160, 1345] m/s
0.6	50	$2.82-0.0016V_{sx}$	[160, 1345] m/s
0.7	50	$2.73-0.0016V_{sx}$	[160, 1345] m/s
0.8	50	$2.67-0.0016V_{sx}$	[160, 1345] m/s
0.9	50	$2.56-0.0015V_{sx}$	[160, 1345] m/s
1.0	50	$2.46-0.0014V_{sx}$	[160, 1345] m/s
1.1	50	$2.32-0.0013V_{sx}$	[160, 1345] m/s
1.2	50	$2.23-0.0012V_{sx}$	[160, 1345] m/s
1.3	50	$2.19-0.0012V_{sx}$	[160, 1345] m/s
1.4	50	$2.10-0.0010V_{sx}$	[160, 1345] m/s
1.5	50	$2.05-0.00088V_{sx}$	[160, 1345] m/s
1.6	50	$1.91-0.00083V_{sx}$	[160, 1345] m/s
1.7	50	$1.81-0.00078V_{sx}$	[160, 1345] m/s
1.8	50	$1.80-0.00077V_{sx}$	[160, 1345] m/s
1.9	50	$1.73-0.00071V_{sx}$	[160, 1345] m/s
2.0	50	$1.69-0.00066V_{sx}$	[160, 1345] m/s

La Figura 4 muestra el efecto de utilizar el método propuesto, utilizando como espectro en roca el propuesto por la norma NCh 433 Of. 96 de Chile y el IBC 2006 de Estados Unidos. En ambos casos, se amplifica el espectro de roca de acuerdo a las ecuaciones propuestas, lográndose una transición suave al variar la rigidez del perfil de suelo utilizado. Se utilizan tres perfiles de suelo como ejemplo, uno corresponde a un perfil de velocidad de onda de corte con V_{S5} , V_{S20} , V_{S30} y V_{S50} de 145, 388, 501 y 653 m/s respectivamente; los otros dos perfiles se toman como la mitad y el doble de los V_s del primer perfil. Nótese que de acuerdo a lo anterior el perfil de suelo más rígido tiene V_{S30} de 1025 m/s y V_{S50} de 1307 m/s, lo cual es más rígido que la roca de referencia de 760 m/s por lo que provoca la deamplificación que se observa en la figura.

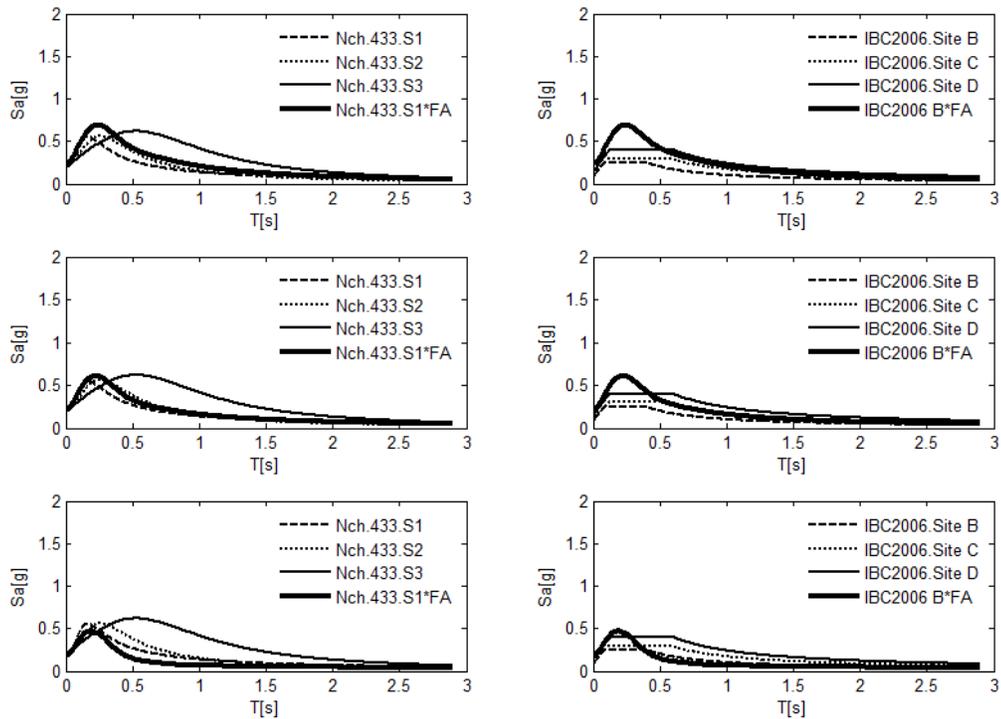


Figura 4: Comparación entre norma NCh 433 Of. 1996 Mod. 2009 Zona 3 y código IBC 2006, para $PGA = 0.1g$ y espectros construidos a partir de las ecuaciones indicadas en la Tabla 2, para tres suelos con V_{sx} creciente.

CONCLUSIONES

La metodología presentada proporciona una alternativa a la clasificación sísmica discreta utilizada por la mayor parte de las normas sísmicas mundiales. Adicionalmente, se muestra cómo con la misma investigación geotécnica y/geofísica, se puede obtener mejores estimaciones de amplificación de sitio.

El método propuesto implica prospectar hasta mayores profundidades para estructuras de periodos largos. Este gasto adicional, en la opinión de los autores, se compensa con el hecho de que estas estructuras son en general, bastante más altas y por lo tanto el costo extra en prospecciones se compensaría con el mayor costo y rentabilidad de la estructura completa.

La metodología adolece de base empírica robusta para suelos blandos (V_{S30} menor que aproximadamente 200 m/s). La base de datos seleccionada incluye sólo sismos de gran magnitud, por lo que el efecto de la intensidad en la amplificación no está considerado. En este caso los factores de amplificación estimados podrían considerarse una cota inferior, debido al efecto de no-linealidad presente en eventos de gran magnitud. Sin embargo, introducir este efecto contribuiría a generalizar el modelo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quisieran reconocer y agradecer sinceramente el apoyo proporcionado por el proyecto de la Dirección de Investigación de la Universidad de Concepción DIUC 205.091.041-1.0 y al National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED), KiK-net, por proporcionar los datos utilizados en este artículo.

REFERENCIAS

- Assimaki, D., Ledezma, C., Montalva, G.A., Tassara A. y Mylonakis G. (2012). "Site effects and damage patterns", Enviado a *Earthquake Spectra* (edición especial sobre el sismo del Maule 2010, previsto para junio de 2012).
- Boore, D. M. (2004). "Estimating Vs30 (or NEHRP site classes) from shallow velocity models (Depths < 30 m)", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 94, pp. 591-597.
- Borcherdt, R. D. (1994). "Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification)", *Earthquake Spectra*, Vol. 10, pp. 617-653.
- Cadet, H. y Duval A.-M. (2009). "A shear wave velocity study based on the Kik-net borehole data: A short note", *Seismological Research Letters*, Vol. 80, No. 3, pp. 440-445.
- Castellaro, S., Mulargia, F. y Rossi, P. L. (2008). "Vs30: proxy for seismic amplification?", *Seismological Research Letters*, Vol. 79, No. 4, pp. 540-543.
- CEN (2003). "Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, part 1: general rules. Seismic actions and rules for buildings, stage 49 draft", Comité Européen de Normalisation, Brussels, Belgium.
- Geoengineering Extreme Events Reconnaissance - GEER (2010). "Geo-Engineering Reconnaissance of the February 27, 2010 Maule, Chile Earthquake", Report of the National Science Foundation-Sponsored GEER Team.
- Hartzell, S., Carver, D., Williams, R.A., Harmsen S. y Zerva S. (2003). "Site response, shallow shear-wave velocity, and wave propagation at the San Jose, California, dense seismic array", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 93, pp. 443-464.
- IBC (2006). *2006 International Building Code*, International Code Council, Inc., Washington, DC.
- Kiban-Kyoshin, N. (2011). Database. Disponible en <http://www.kik.bosai.go.jp/>, accedida por última vez en agosto de 2011.