

ANÁLISIS DE REGISTROS CHILENOS Y PERIODO PREDOMINANTE DEL SITIO

Ramón Verdugo (1); Guillermo Valladares (2)

(1) *Ingeniero Civil, Ph.D., CMGI Ltda.*

(2) *Ingeniero Civil, CMGI Ltda.*

rverdugo@cmgi.cl - gadares@cmgi.cl

Resumen

En paralelo con el espectro de respuesta elástico de pseudo-aceleración del oscilador de un grado de libertad, se analiza la respuesta de pseudo-aceleración aplicando el espectro total de potencia, el que resulta equivalente a la Intensidad de Arias, con lo cual se propone analizar cada registro con un espectro de Intensidad de Arias. Los resultados muestran que éste espectro es un mejor indicador de los periodos donde se acentúa la amplificación sísmica, y en particular identifica más claramente el periodo predominante de un registro sísmico. El análisis de los espectros de respuesta de los registros sísmicos de los terremotos de Illapel y del Maule indica existen dos tipos de resultados: espectros que muestran un bien definido periodo de amplificación de la respuesta de pseudo-aceleración (sitios tipo A) y otros, que por el contrario, presentan varios periodos con similar nivel de amplificación (sitios tipo B). Para los primeros, los análisis de la razón espectral H/V reproducen adecuadamente el periodo predominante obtenido de los espectros. Razones espectrales H/V planas se asocian con periodos predominantes (deducido desde los espectros) menores a 0.4 s, lo cual indica que estos casos corresponden a sitios rígidos. Más investigación es necesaria para determinar las características geotécnicas de los sitios tipo A y B.

Palabras-Clave: Efecto sitio, amplificación sísmica, intensidad de Arias.

Abstract (Obligatorio)

In parallel with the elastic response spectrum of pseudo-acceleration of one degree of freedom oscillator, the response is also analyzed with the total power spectrum, which is mathematically equivalent to the Arias intensity. Then, the spectrum of the Arias Intensity is introduced. The results show that the latter is a better indicator of the predominant period. The analyses of the response spectra of seismic records of Illapel and Maule earthquakes allow to distinguish between spectra that show a well-defined period of amplification (sites type A) and others, that present several periods with a similar level of amplification (sites type B). For site A, the H/V spectral ratios reproduced satisfactorily the predominant period deduced from the response spectra. H/V spectral ratios of plane shapes are associated with predominant periods (deduced from the response spectra), less than 0.4 s, indicating that these cases are associated with rigid sites. More research is needed to determine the geotechnical characteristics of type A and B sites.

Keywords: Site effect, Seismic amplification, Arias Intensity.

1 Introducción

Los últimos terremotos ocurridos en Chile han confirmado el conocido hecho empírico que las características geotécnicas del terreno afectan significativamente la respuesta sísmica observada en superficie. Sin embargo, la evaluación en profundidad de las propiedades geomecánicas de un sitio, en la práctica es difícil de llevar a cabo, tanto por razones económicas como por plazo de ejecución, especialmente en depósitos de suelos de importante espesor. Por esto resulta de gran relevancia desarrollar y establecer metodologías económicas y de rápida ejecución que permitan obtener los parámetros más relevantes que controlan la respuesta sísmica en superficie de un depósito de suelos.

Por una parte, se ha introducido como parámetro relevante de las condiciones geotécnicas de un sitio, la velocidad de la onda de corte representativa de los 30 m superiores de un depósito de suelos (Borcherdt y Glassmoyer, 1992; Borcherdt, 1994 y otros). Este parámetro, V_{S30} , es tal que reproduce el tiempo de recorrido vertical de la propagación de las ondas de corte a lo largo de los 30 m superiores del terreno. La decisión de adoptar una profundidad de 30 m fue de alguna manera arbitraria y se asocia principalmente a razones prácticas, ya que corresponde a la profundidad de exploración típica de sondajes geotécnicos en obras civiles de cierta importancia. Aun cuando existe importante evidencia sobre las limitaciones de este parámetro, a nivel mundial la mayoría de los códigos de diseño sísmico lo utilizan en la clasificación sísmica de sitio. Para mejorar esta situación se estima de gran utilidad tener como información complementaria el periodo predominante de vibración del sitio. Este dato es vital pues proporciona información de todo el depósito de suelos, de toda su competencia o espesor. El periodo predominante de vibración se podría estimar vía medición de vibraciones ambientales realizadas en la superficie del terreno, aplicando el método de Nakamura (Nakamura, 1989), o razón espectral (H/V). Por su rapidez, simplicidad y bajo costo, este método resulta sumamente atractivo. El método de la razón espectral H/V, básicamente, utiliza el cociente de los espectros de Fourier de los movimientos horizontal y vertical asociados vibraciones ambientales (Verdugo et al, 2005, entre muchos otros).

En este artículo se presenta el análisis de los registros disponibles de los terremotos del Maule (Magnitud $M_w=8.8$) e Illapel (Magnitud $M_w=8.3$), incluyendo el detalle de los espectros de respuesta de pseudo-aceleraciones, Intensidad de Arias y Razón Espectral H/V, comparando los resultados en términos de estimación del periodo predominante del sitio.

2 Espectro de respuesta, espectro de potencia y espectro de Intensidad de Arias

Durante la ocurrencia de un sismo, en la superficie del terreno se obtienen registros sísmicos correspondientes al historial de aceleraciones que se desarrollan en él. Una forma estándar de evaluar el contenido de frecuencia del registro sísmico y la amplificación asociada a cada frecuencia, es a través del cálculo del espectro de respuesta elástico de pseudo-aceleración de un oscilador de un grado de libertad, con un amortiguamiento viscoso del 5% del crítico. Aplicando el registro sísmico a osciladores de diferente periodo fundamental, se calcula para cada uno la máxima pseudo-aceleración de respuesta. El espectro de respuesta se construye graficando la máxima pseudo-aceleración obtenida para cada periodo que representa a cada oscilador. Es importante señalar que la respuesta del oscilador, en términos de pseudo-aceleración, puede presentar un máximo seguido de otros máximos locales de significativo menor valor, o por el

contrario, puede presentar un valor máximo seguido de muchos otros valores máximos que son levemente inferiores al máximo absoluto. El espectro de respuesta no tiene en consideración este tipo de diferencias, solo utiliza el valor máximo. Por esta razón se decidió utilizar paralelamente un nuevo parámetro que incluyera de mejor forma la totalidad de la respuesta del oscilador, para lo cual se ha optado por el espectro total de potencia. Cualquier señal, por ejemplo, la variación de la aceleración en el tiempo, puede ser analizada a través del espectro total de potencia, el que permite tener una estimación de la intensidad de la señal. La expresión para evaluar el espectro total de potencia, P_t , de una señal $a(t)$ es la siguiente:

$$P_t = \int_0^{T_t} [a(t)]^2 dt \quad (1)$$

Donde T_t representa el tiempo total donde la función $a(t)$ se desarrolla.

Por otra parte, resulta importante tener presente la expresión desarrollada por Arias (Arias 1970) para definir la intensidad numérica de un sismo. La intensidad de Arias describe la energía acumulada por unidad de peso absorbida por un conjunto infinito de osciladores de un grado de libertad cuyas frecuencias fundamentales se distribuyen uniformemente de cero a infinito. La expresión de la intensidad Arias de un registro sísmico de aceleración, I_A es la siguiente:

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{T_t} [a(t)]^2 dt \quad (2)$$

Donde T_t representa la duración del registro sísmico.

Resulta interesante observar que la intensidad de Arias, I_A , es matemáticamente similar al espectro total de potencia de la función en consideración. Es decir:

$$P_t = \frac{2g}{\pi} I_A \quad (3)$$

Abusando de esta similitud matemática, se ha decidido definir el Espectro de Intensidad de Arias, que corresponde a la Intensidad de Arias evaluada a la respuesta completa en términos de aceleraciones de cada oscilador de un grado de libertad incluido en el espectro. De esta forma el espectro de Intensidad de Arias incluye la totalidad de la respuesta del oscilador y no solo el valor de su aceleración máxima.

3 Terremoto de Illapel 2015

El 16 de septiembre de 2015 ocurrió el terremoto de Illapel, de Magnitud $M_w = 8.3$, a una profundidad de 8.2 km, según el Centro Sismológico Nacional. En la Fig. 1 se presenta la ubicación de las estaciones sísmicas que registraron este evento y el detalle las aceleraciones máximas registradas en cada estación. Se observa que la mayor aceleración horizontal registrada alcanzó 0.83g (estación C110, componente E-W). Los registros disponibles con aceleraciones máximas horizontales iguales o superiores a 0.1g fueron analizados (datos en rojo de las primeras 19 estaciones), determinándose para cada uno los espectros de respuesta elástico de pseudo-aceleración para un 5% de amortiguamiento respecto del crítico y el Espectro de Intensidad de Arias. Adicionalmente, en estas estaciones se analizaron los registros obtenidos de eventos

sísmicos de magnitud mediana ($M_w > 5$), evaluándose para cada estación el espectro promedio de respuesta normalizado por la aceleración máxima (S_a/a_{max}). Por otra parte, en cada una de estas estaciones se utilizaron los registros de eventos sísmicos con aceleraciones horizontales menores a 0.1g para evaluar la razón espectral H/V (método de Nakamura), a partir de los cuales se evaluó el valor promedio de estas razones.

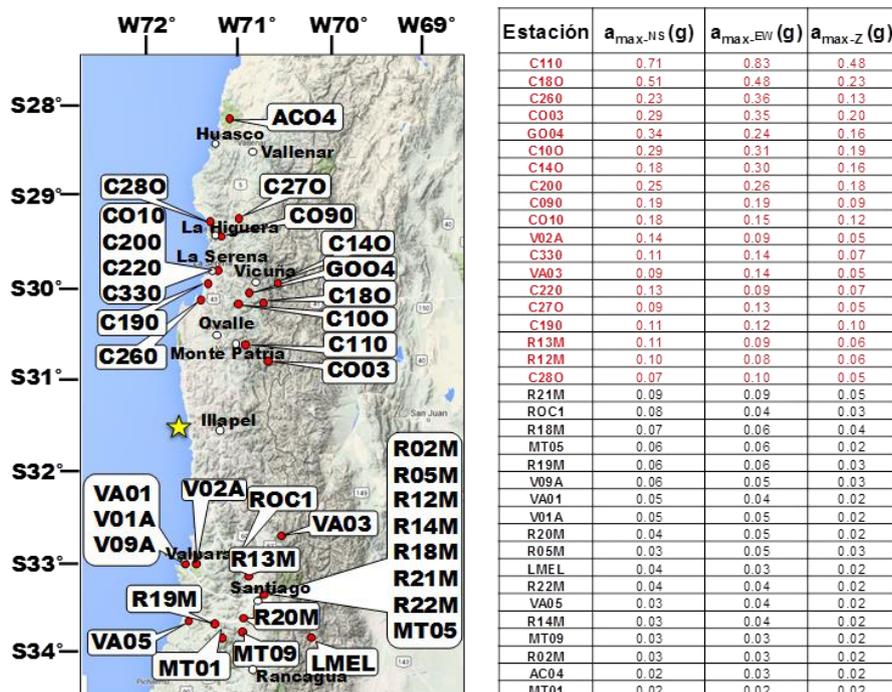


Fig. 1.- Estaciones que registraron el Terremoto de Illapel y aceleraciones máximas

Los resultados obtenidos han sido separados en dos grandes grupos: sitios tipo A, correspondientes a aquellas estaciones donde los registros analizados proporcionan espectros de respuesta de pseudo-aceleración con un claro periodo donde se amplifica la respuesta sísmica y que además, ambas componentes (N-S y E-W) coinciden con un único valor de este periodo de mayor amplificación. La razón espectral H/V y los espectros de respuesta e Intensidad de Arias se grafican en la Fig. 2. Por otra parte, los sitios en que no es evidente la existencia de un periodo donde la respuesta es amplificada y se observa más bien una banda de periodos, en que se amplifica la respuesta, se han agrupado bajo la denominación de sitios tipo B, cuyos análisis se grafican en la Fig. 3, indicándose el ancho de banda donde se desarrolla la máxima amplificación. Para cada uno de los sitios tipo A, en la Fig. 4a se grafican el periodo de mayor amplificación obtenidos para cada componente, observándose que en ambas direcciones se alcanza el mismo periodo predominante. Por su parte, en la Fig. 4b se presentan los resultados para los sitios tipo B, observándose que el periodo donde se da la mayor respuesta, difiere dependiendo de la componente analizada. Para los sitios tipo A, en la Fig. 4c se compara el periodo predominante característico del sitio, obtenido del espectro de pseudo-aceleración, con el periodo deducido de la razón espectral H/V de registros sísmicos de baja magnitud y aceleración. Se observa para sitios tipo A, la razón espectral H/V de sismos pequeños proporciona una excelente herramienta para estimar el valor del periodo predominante de un depósito de suelos.

Resulta importante señalar que el espectro de Intensidad de Arias, en comparación con el espectro de respuesta de pseudo-aceleración, identifica de mejor manera el periodo

predominante, pues amplifica significativamente dicho periodo respecto del resto. Inclusive en los sitios tipo B, el espectro de Intensidad de Arias filtra mejor la respuesta, identificando de mejor forma el periodo de mayor amplificación.

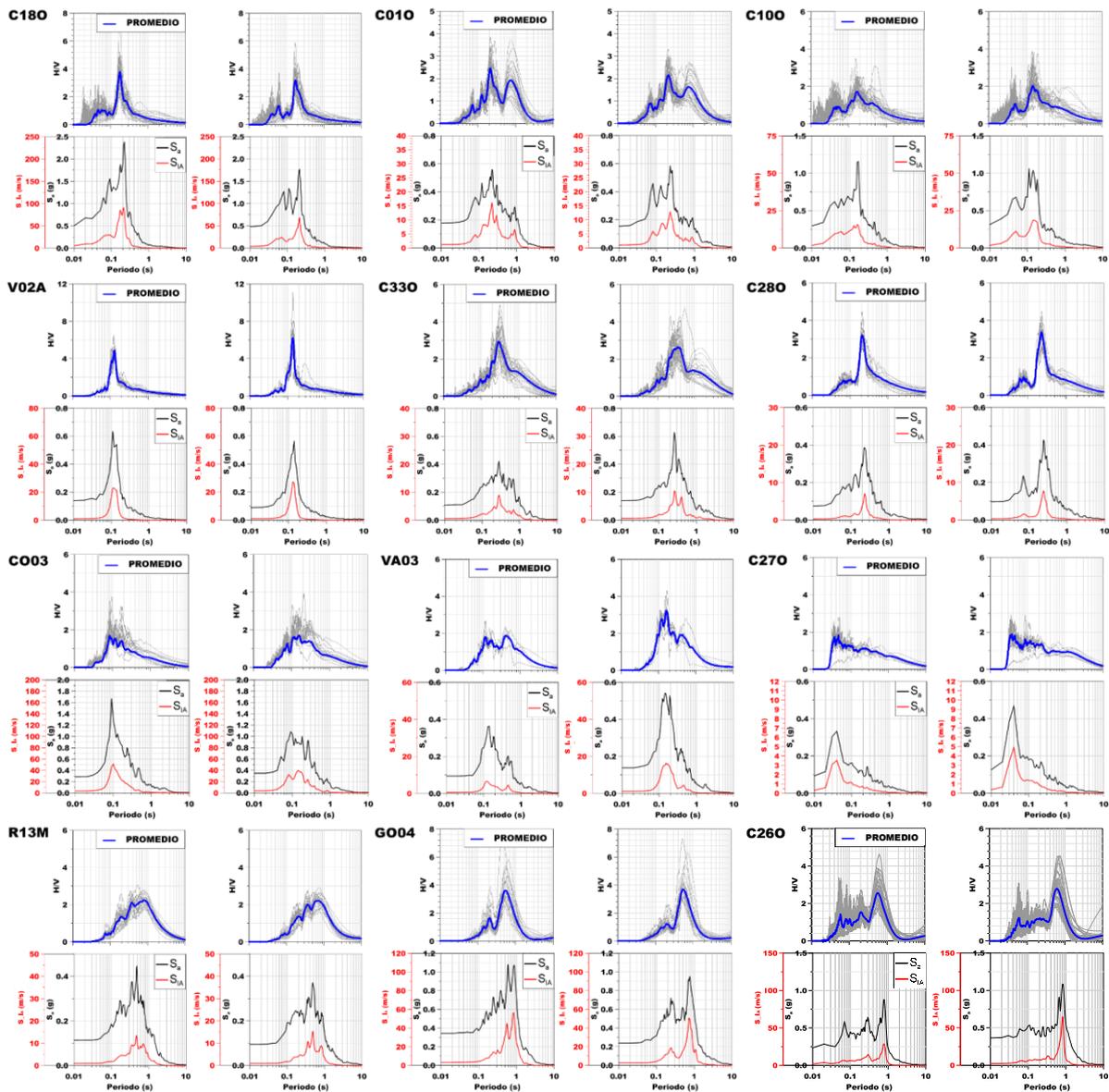


Fig. 2.- Espectros y razón espectral H/V en sitios tipo A

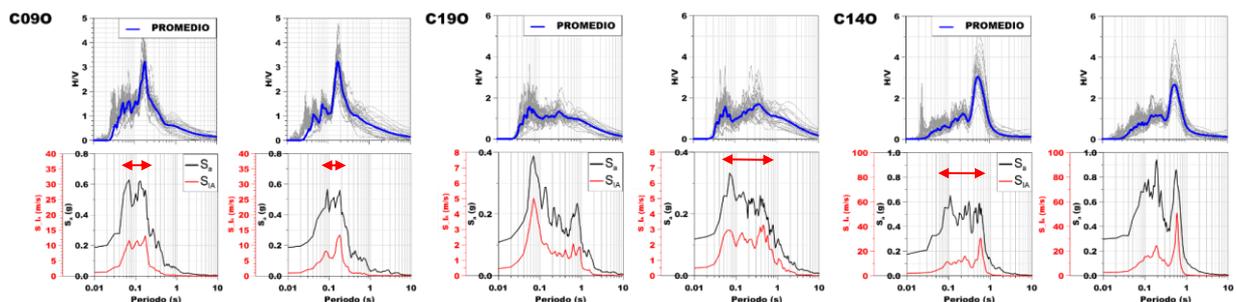


Fig. 3.- Espectros y razón espectral H/V en sitios tipo B

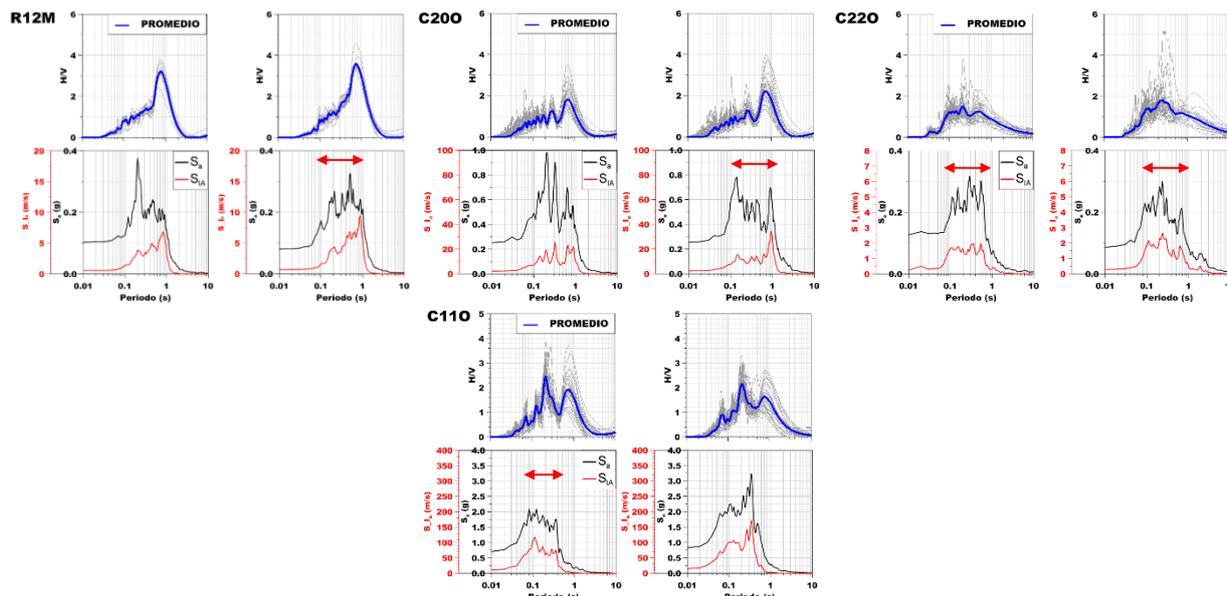


Fig. 3 (continuación).- Espectros y razón espectral H/V en sitios tipo B

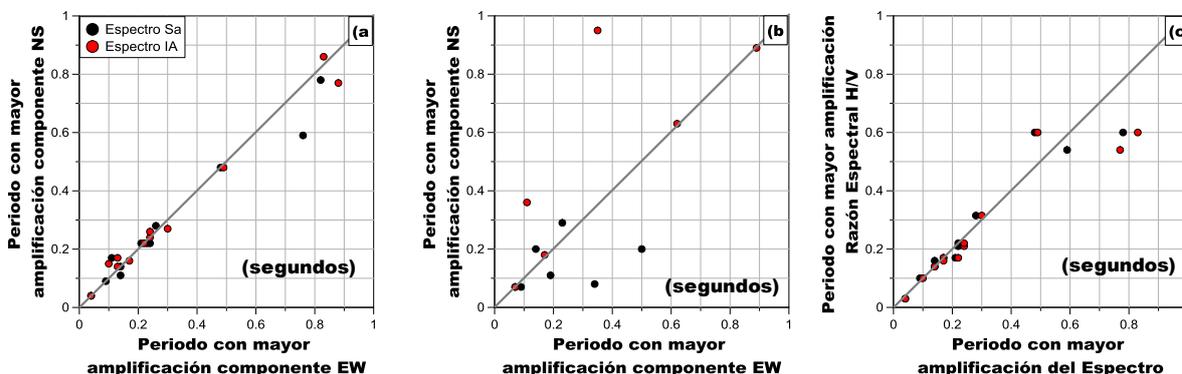


Fig. 4.- Periodo predominante de cada componente a) Sitios tipo A, b) Sitios tipo B.

c) Periodo predominante obtenido de espectros y de razón espectral H/V en sitios tipo A

4 Terremoto del Maule 2010, 27F

El 27 de Febrero de 2010 se produjo el terremoto del Maule, de Magnitud $M_w = 8.8$, con una profundidad promedio de 35 km, afectando la zona Centro-Sur de Chile. En la Fig. 5 se presentan las aceleraciones horizontales máximas de estaciones instaladas en depósitos suelos y roca (Verdugo and González 2015). En los registros disponibles se evaluaron los espectros de respuesta elástico de pseudo-aceleración para un 5% de amortiguamiento respecto del crítico y los Espectros de Intensidad de Arias. Adicionalmente, en estas estaciones se analizaron las mediciones disponibles de la razón espectral H/V de mediciones de vibraciones ambientales. Los espectros de respuesta y de Intensidad de Arias de los registros del terremoto del Maule se presentan en la Fig. 6, para aquellos casos donde se advierte claramente un periodo predominante de amplificación, sitios que han sido denominados tipo A. Por otra parte, en la Fig. 7 se han agrupado los sitios cuyos espectros presentan una amplificación que no queda definida para un periodo en particular, siendo ésta repartida en un rango de periodos. En la Fig. 8a se presentan los periodos predominantes obtenidos para cada componente de los espectros de los registros respectivos de sitios tipo A.

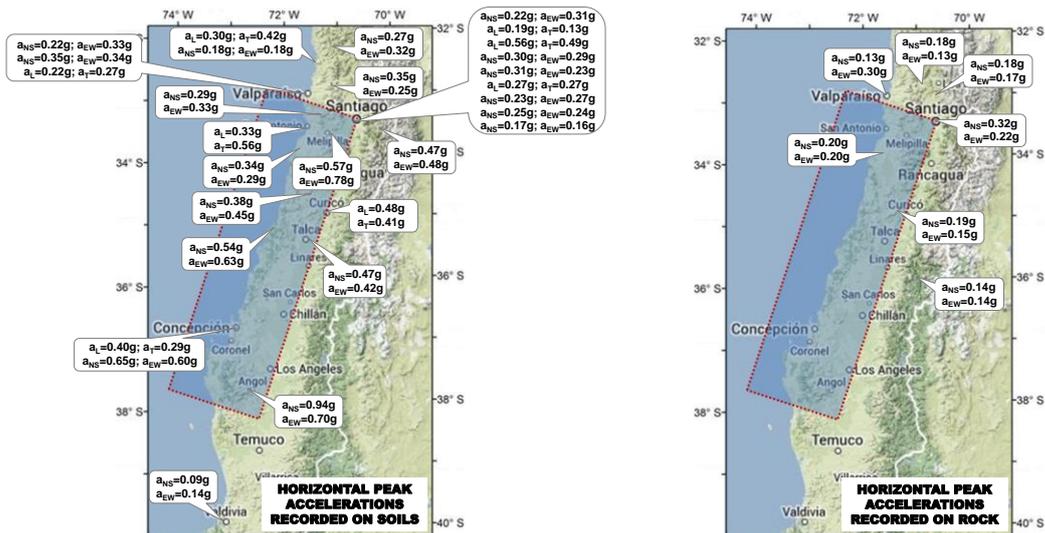


Fig. 5.- Aceleraciones horizontales máximas Terremoto del Maule: a) Depósitos de Suelo, b) Roca

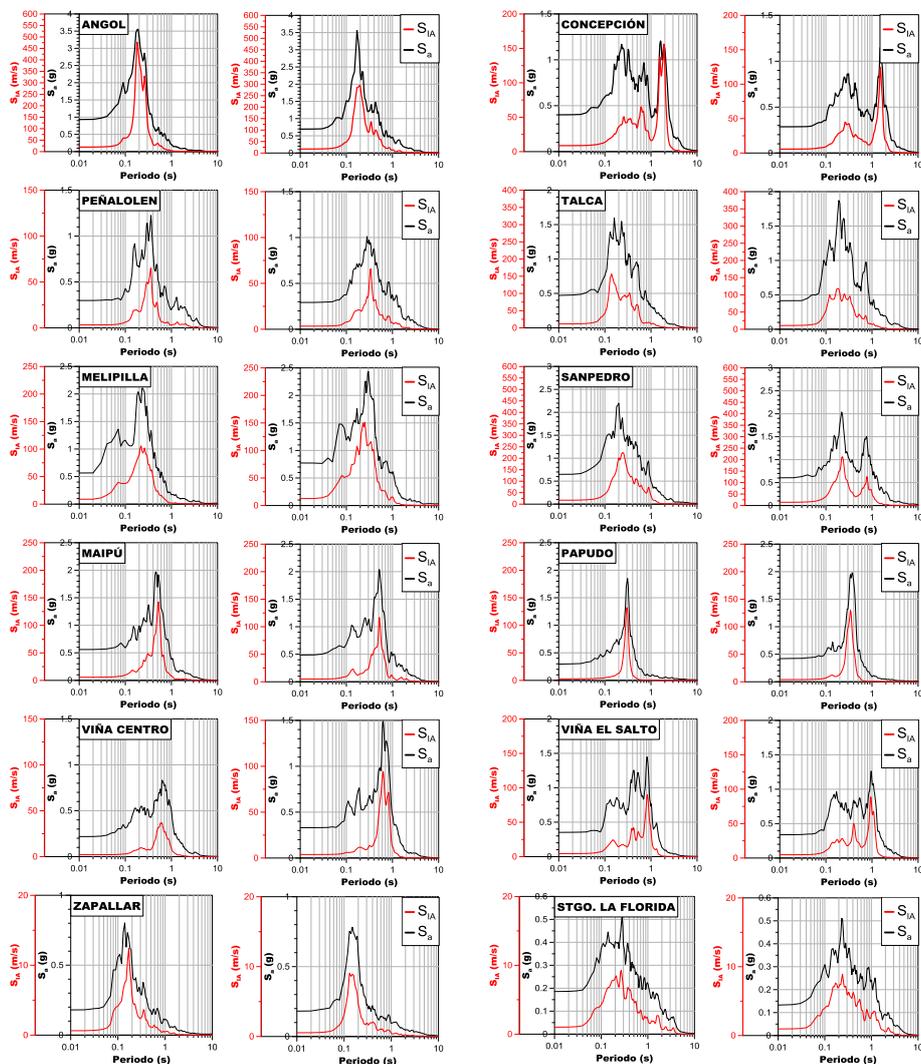


Fig. 6.- Sitios tipo A. Espectros de respuesta y de Intensidad de Arias

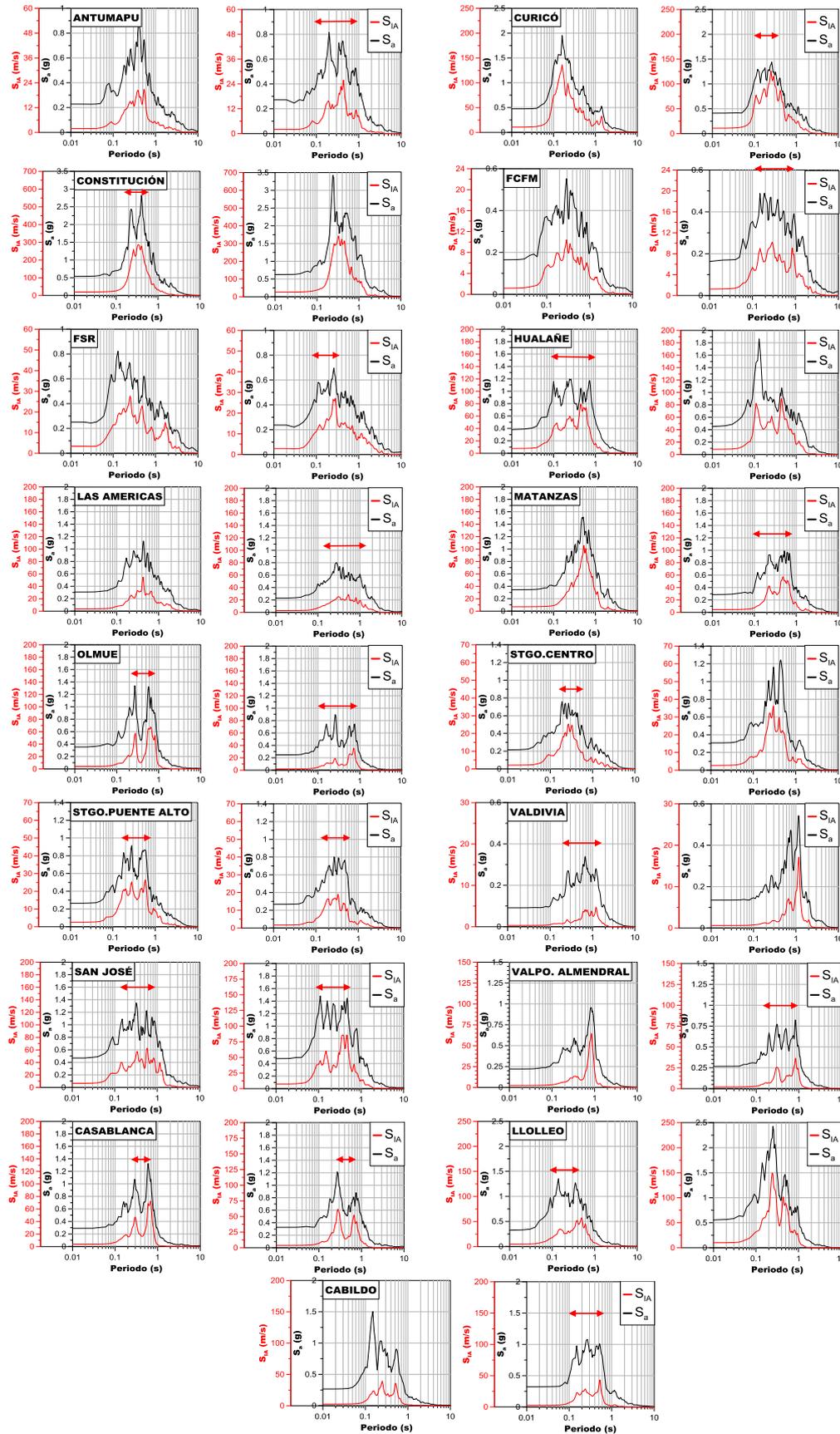


Fig. 7.- Sitios tipo B. Espectros de respuesta y de Intensidad de Arias

Se observa que para los sitios tipo A, el periodo predominante obtenido de los espectros de respuesta y de Intensidad de Arias son coincidentes y además, es prácticamente el mismo para ambas componentes horizontales. Como se deduce de la Fig. 8b, esta situación no representa los sitios identificados como tipo B, resultando diferente el valor del periodo predominante según la componente del registro sísmico analizada. Esto confirma el hecho que estos sitios no presentan un periodo predominante, y más bien desarrollan un rango de periodos donde se amplifica la respuesta del sitio.

Para los sitios identificados como tipo A, en la Fig. 8c se presentan los periodos obtenidos de los espectros y los estimados a partir de la razón espectral H/V de vibraciones ambientales (por razones de espacio no se presenta cada razón espectral H/V). Se observa una buena coincidencia del valor del periodo predominante de cada sitio, confirmándose la utilidad del método de la razón espectral H/V de vibraciones ambientales para estimar el periodo predominante de un sitio.

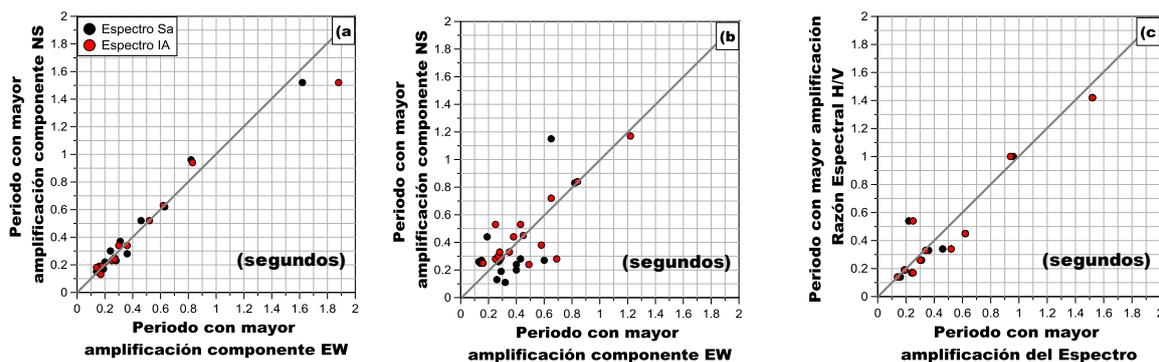


Fig. 8.- Periodo predominante de cada componente a) Sitios tipo A, b) Sitios tipo B.
 c) Periodo predominante obtenido de espectros y de razón espectral H/V en sitios tipo A

5 Principales conclusiones

A partir de la utilización del espectro total de potencia para analizar la respuesta de pseudo-aceleración del oscilador de un grado de libertad, se introdujo de manera equivalente el espectro de Intensidad de Arias. Los resultados muestran que este último es un mejor indicador de los periodos donde se acentúa la amplificación sísmica, y en particular identifica más claramente el periodo predominante de un registro sísmico.

El análisis de los espectros de respuesta de los registros sísmicos de los terremotos de Illapel ($M_w = 8.3$) y del Maule ($M_w = 8.8$) permite identificar básicamente dos tipos de respuesta: espectros que muestran un bien definido periodo de amplificación de la respuesta de pseudo-aceleración y otros, que por el contrario, presentan varios periodos de amplificación, siendo posible identificar un rango de periodos donde la respuesta de pseudo-aceleración es amplificada. El primer grupo se ha denominado sitios tipo A y el segundo sitios tipo B.

En los sitios tipo A, los espectros de cada componente horizontal presentan el mismo periodo predominante, con lo cual es posible asociarle a cada sitio un único periodo predominante. En los sitios tipo B, al seleccionar del espectro de respuesta de cada componente el periodo de mayor pseudo-aceleración, se obtienen diferentes periodos para cada componente, con lo cual no es posible asociarle al sitio un único periodo predominante. Esto confirma que los sitios tipo B presentan un rango de periodos donde la respuesta se amplifica.

En los sitios donde se registró el terremoto de Illapel, se obtuvo la razón espectral H/V de una serie de temblores registrados, y de estos el periodo de mayor amplitud. Este periodo resultó coincidente con el deducido de los espectros de respuesta y de Intensidad de Arias. Esto confirma la capacidad de la razón espectral H/V para estimar el periodo predominante de un sitio. Por otra parte, en los sitios donde se dispone de registros del terremoto del Maule, se obtuvo la razón espectral H/V del registro de vibraciones ambientales, estimándose de éstas el periodo predominante de cada sitio. Para sitios tipo A, se confirma que este último procedimiento permite estimar de buena forma dicho periodo predominante. Algunas razones espectrales H/V de vibraciones ambientales resultaron planas, no permitiendo estimar un periodo predominante. En estos casos, el periodo predominante de los espectros fue menor a 0.4 s, asociado a sitios rígidos.

De manera empírica se ha establecido la existencia de sitios con un definido periodo predominante (sitios tipo A) y otros donde se aprecia un rango de periodos de amplificación de la respuesta (sitios tipo B). La pregunta que surge inmediatamente es qué factores del terreno hacen que el comportamiento sísmico sea uno u otro. Al no conocerse el subsuelo hasta el basamento rocoso bajo las estaciones sísmicas, no resulta posible responder esta pregunta. Sin embargo, es posible señalar que los sitios tipo B pueden obedecer a una compleja secuencia estratigráfica con importantes variaciones de rigidez e incluso con inversiones de rigidez, lo cual induce una respuesta sísmica en superficie donde varios modos de vibrar son relevantes y en definitiva la amplificación queda también dependiente de las frecuencias del input sísmico. Sin duda más investigación es necesaria para clarificar estos tipos de respuestas.

6 Agradecimientos

Los autores agradecen a Renadic y al Centro Sismológico de la Univ. de Chile por la disponibilidad de los registros sísmicos. Se agradece el apoyo de CMGI Ltda. en la ejecución de este estudio.

Referencias

- [1] Arias A. A Measure of Earthquake Intensity, R.J. Hansen, ed. Seismic Design for Nuclear Power Plants, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1970. pp. 438-483.
- [2] Borcherdt R.: Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification). Earthquake Spectra. 1994, 10 (4), 617-653
- [3] Borcherdt, R. and Glassmoyer, G. On the characteristics of local geology and their influence on ground motions generated by the Loma Prieta earthquake in the San Francisco Bay region, California. Bull. Seis. Soc. Am. 1992, 82, 603-64.
- [4] Nakamura Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Q. Report of R. T. R. I. 1989. 30:1, 25-33.
- [5] Verdugo R, Pastén C, Campos J, Bonilla F. Uso de la razón espectral H/V en superficie para la caracterización sísmica de Santiago. IX Jornadas Achisina, Concepción. Nov. 2005.
- [6] Verdugo R. and Gonzalez J. Liquefaction-induced ground damages during the 2010 Chile Earthquake. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 79. 2015. pp. 280–295.