

## ESTIMACIÓN CUANTITATIVA DE LA AMENAZA SÍSMICA EN BASE A MÉTODOS GEOFÍSICOS: APLICACIÓN A LAS LOCALIDADES COSTERAS DEL SEGMENTO LOS VILOS – SAN ANTONIO

Laura Mendoza(1); Felipe Ayala(1); Belén Fuentes(1); Valeria Soto(1); Esteban Sáez(1); Gonzalo Yañez(1); Gonzalo Montalva(2); Paola Ramírez (3); Carlos Gáez (3); Natalia Sepúlveda (3); Iris Lazo (3); Javiera Ruiz(1);

(1) *Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Pontificia Universidad Católica de Chile*

(2) *Universidad de Concepción*

(3) *Servicio Nacional de Geología y Minería*

[esaez@ing.puc.cl](mailto:esaez@ing.puc.cl)

### Resumen

Chile es un país altamente sísmico, por esta razón es útil contar con estudios de microzonificación sísmica que permitan determinar las áreas donde se espera una mayor amplificación del movimiento sísmico y complementen el sistema de clasificación sísmica de sitios vigente. El presente trabajo muestra el desarrollo de la estimación cuantitativa de la amenaza sísmica en el bloque costero entre las localidades de Los Vilos y San Antonio. Para la caracterización sísmica de los suelos se realizó una campaña de exploración geofísica que consistió en la ejecución de más de 200 mediciones de velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ) empleando los métodos basados en dispersión de ondas de superficie. Mediante un proceso de inversión se generaron perfiles de suelo, obteniendo los parámetros  $V_{s30}$  y  $V_{s<900}$  (promedio ponderado hasta la profundidad donde  $V_s$  es menor de 900 m/s), además se obtuvieron las razones espectrales  $H/V$ , determinando las frecuencias predominantes ( $f_0$ ) y amplitudes máximas ( $A_0$ ). Con los resultados obtenidos, la geología, la topografía, datos de gravimetría y una ley de atenuación desarrollada para el segmento de estudio [1] se generaron polígonos que indican las zonas que son propensas a sufrir mayor amplificación así, como mapas de intensidad de movimiento, que se basan en la escala de Intensidad Instrumental usada actualmente por el USGS [2].

*Palabras Clave: Microzonificación sísmica, amplificación sísmica, clasificación sísmica*

### Abstract

Chile is a high seismic country, for this reason it is convenient to have seismic microzonation studies that allow to determine the areas where a greater amplification of the seismic movement is expected, and could be used in conjunction current seismic site classification. The present paper shows the development of the quantitative estimation of the seismic risk in the coastal block between Los Vilos and San Antonio. For the seismic characterization of the soils, a geophysical exploration was carried out consisting in the execution of more than 200 measurements of shear wave velocities ( $V_s$ ) using the methods based on surface waves dispersion. Through an inversion process, soil profiles were generated, obtaining the parameters  $V_{s30}$  and  $V_{s<900}$  (weighted average to a depth while  $V_s$  is less than 900 m/s), in addition the spectral ratios  $H/V$ , determining the predominant frequencies ( $f_0$ ) and the maximum amplitudes ( $A_0$ ). With the obtained results, geology, topography, gravimetry data and a ground prediction equation developed for this segment [1] we generated polygons that indicate the areas that are prone to undergo greater amplification as well as maps of seismic intensity, which are based on the Instrumental Intensity scale proposed used by the USGS [2].

*Keywords: Seismic microzonation, Seismic amplification, Seismic classification*



**SOCIEDAD CHILENA DE GEOTECNIA**  
CHILEAN GEOTECHNICAL SOCIETY

## 1 Introducción

Los sismos son un fenómeno recurrente que se presentan a nivel mundial, con una concentración especial en la zona denominada cinturón de fuego del Pacífico. Chile está situado dentro de esta zona y se encuentra afectado por el fenómeno de subducción entre la placa Nazca y la Sudamericana cuya constante fricción es la causal de la alta actividad sísmica en el país [3], caracterizada por terremotos de gran intensidad, entre ellos el de mayor magnitud registrada en el mundo ocurrido en 1960 con una magnitud de momento ( $M_w$ ) de 9.5. También destaca el sismo de Maule del año 2010 de  $M_w$  8.8, entre muchos otros de  $M_w$  superiores a 7. Estas características convierten a Chile en un país de potencial alta vulnerabilidad sísmica [4], lo que hace conveniente contar con mapas que proporcionen información sobre la amenaza sísmica a nivel local que permitan determinar los posibles efectos de sitio.

Las actuales normas de clasificación sísmica se basan en la utilización parámetros de ruptura de los suelos obtenidos de sondajes, además del parámetro dinámico  $V_{s30}$  (promedio armónico de la velocidad de las ondas de corte en los primeros 30 metros del terreno). Sin embargo, en el presente trabajo se presenta una propuesta de microzonificación basada en mediciones geofísicas que permiten determinar el perfil de velocidades de las ondas de corte ( $V_s$ ) y el periodo predominante del suelo ( $T_0$ ). Los métodos de prospección geofísicos sísmicos, cuentan con la ventaja de que proporcionan de una manera ágil y no invasiva las propiedades a pequeña deformación de los suelos tanto de manera superficial como a decenas de metros.

Este estudio muestra los resultados de mediciones geofísicas realizadas en el segmento costero entre Los Vilos y San Antonio, que combinados con una ley de atenuación [5] que caracteriza el movimiento fuerte usando parámetros de la fuente sismogénica hasta el lugar de interés debidamente caracterizado por parámetros geofísicos, permite generar mapas de microzonificación sísmica y amenaza sísmica. La forma funcional de la ley de atenuación corresponde a una adaptación del modelo utilizado por [6], que basa su trabajo en lo propuesto por [7]. Esta ley de atenuación, además de poseer el  $V_{s30}$  como variable explicativa para los efectos de sitio, utiliza el periodo predominante. Los registros de la base de datos que considera la ley de atenuación corresponden a un subconjunto de datos publicados por [8] para Chile, donde abarcan eventos del tipo subducción que van desde el terremoto de Valparaíso de 1985 hasta eventos de septiembre de 2015. Adicionalmente se incorporan registros publicados por el centro sismológico nacional (CSN), que permiten contar con la data hasta el 2 de agosto de 2017.

## 2 Antecedentes Geológicos y Geomorfológicos del área de estudio

El área de estudio comprende aproximadamente 248 km de borde costero iniciando en la localidad de Los Vilos (IV Región) y concluyendo en la localidad de San Antonio en la (V Región). Dentro del marco geológico se presentan unidades de carácter neógeno: sedimentarias y volcánicas cuaternarias, dentro de las unidades sedimentarias se evidencian terrazas marinas, paleodunas no diferenciadas, depósitos fluvio-coluviales, eólicos y de playa, dunas actuales, Estratos

de Potrero Alto y las siguientes formaciones (Fm): Confluencia Coquimbo, Navidad, Horcón y Las Cuevas y dentro de las unidades volcánicas se encuentran Lavas Las Pataguas, Estratos de Potrero Alto y Fm Pudahuel. Además existen Unidades Volcánicas Paleozoico-Mesozoico como la Fm Horqueta, Ajial Los Moles, Pichidangui y Quereo. A lo largo de toda la costa se encuentran intrusivos Paleozoico Mesozoico. Finalmente se aprecian zonas fallas geológicas potencialmente activas tales como falla Aconcagua, Marga-Marga, Valparaíso, Laguna Verde, Quintay, Quebrada Los Loros-Purísima, San Jerónimo, Pino Mar, Melipilla, Estero Ñanco y Río Maipo.

### **3 Campaña de exploración geofísica y análisis de datos**

#### **Campaña de exploración**

Para la toma de datos se partió de la revisión de la geología existente, con dicha información se realizó la evaluación de las unidades geológicas de cada localidad comprendida en el área de estudio. En sitios donde se encontraron fallas activas, cambios en la litología o zonas donde se estimaba detectar suelos blandos, se ubicaron los puntos a ser analizados.

Los ensayos geofísicos planificados consistieron en mediciones de las velocidades de ondas Superficiales de tipo Rayleigh (activo y pasivo). Con dicho método se estimó el perfil de velocidades de las Ondas de Corte de manera superficial y se propuso la profundidad del contacto entre suelo y roca considerando como roca en sentido geotécnico a materiales con  $V_s > 900$  m/s. En los sitios donde se encontró suelos muy rígidos superficialmente se empleó el ensayo de Sísmica de Refracción, determinando el perfil de Velocidades de ondas compresionales ( $V_p$ ) y para todos los terrenos se realizaron mediciones de vibraciones ambientales para determinar la frecuencia predominante del suelo ( $f_0$ ).

Para la caracterización sísmica de los suelos se realizó un total de 232 mediciones de velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ). Los equipos utilizados para el desarrollo del trabajo fueron un sismográfico digital de 24 canales, al que se conectó geófonos de frecuencia natural de 4.5 Hz o de 1 Hz dependiendo del tipo de suelo cuya separación entre geofonos varió entre 2 y 5 m. En ciertos casos, se realizaron arreglos bidimensionales tanto circulares como en L. Además, se realizaron más de 600 mediciones de vibraciones ambientales empleando sismómetros triaxiales portátiles de la marca Tromino®. Si el equipo se orienta en la dirección del Norte magnético, estas componentes son N-S, E-W y V.

#### **Interpretación de datos**

Se empleó un método de análisis espectral de frecuencia y número de onda (F-K), [9] [10] para mediciones activas y pasivas. La interpretación de las mediciones de vibraciones ambientales pasivas lineales fue realizada mediante un análisis ESPAC [11] y para ensayos pasivos bidimensionales se utilizó el método SPAC [12]. Mediante un proceso de inversión se generaron perfiles de suelo, obteniendo los parámetros promedio  $V_{s30}$  y  $V_{s<900}$  (promedio armónico de capas superficiales hasta alcanzar material de  $V_s > 900$  m/s ó 30m de profundidad, lo que ocurra primero).

Las mediciones de ruido ambiental triaxial se analizaron mediante el método de Nakamura o HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) [13], el que consiste en estimar la razón entre el espectro de amplitudes de Fourier de las componentes horizontales y verticales de las vibraciones ambientales medidas en superficie (razón espectral H/V). Estas vibraciones en su conjunto hacen vibrar preponderantemente al depósito de suelos a su frecuencia fundamental [14], la cual puede ser identificada como el valor peak de la razón espectral H/V. Por ello, se ha convertido en una herramienta ampliamente utilizada en estudios de microzonificación sísmica y efectos de sitio. El análisis se efectuó considerando una variante al método de Nakamura [15], que considera ventanas de análisis de 60 segundos, aplicando a cada ventana la transformada de Stockwell [16] por componente.

#### 4 Mapas de Microzonificación sísmica cualitativa

Actualmente existen normas técnicas sismo-resistentes como por ejemplo: Norma ASCE7-10 para Estados Unidos, Eurocode 8 (British Standards Institution 2004) para los países que forman la Unión Europea, y NCh433 para Chile. Estos códigos incluyen clasificaciones sísmicas de los suelos orientadas a definir la propensión de sitios a experimentar amplificación sísmica que debe ser considerado al momento de realizar una construcción habitacional, asignado letras que van desde la A para suelos rígidos de excelente rigidez a suelos tipo E que son suelos más flexibles. Además, existe una categorización adicional que son suelos tipo F considerados como suelos especiales ya que además de poseer bajas propiedades físicas son suelos susceptibles, colapsables o que pueden presentar licuación. En la Tabla 1 se muestra la actual clasificación sísmica vigente para Chile.

Tabla 1 – Clasificación sísmica Chile.

Categoría	Tipo de Suelo
A	Roca, Suelo Cementado
B	Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme
C	Suelo denso o firme
D	Suelo medianamente denso o firme
E	Suelo de compacidad o consistencia mediana
F	Suelos especiales

Debido a la experiencia obtenida de los terremotos de Maule 2010, Iquique 2014 e Illapel 2015 ha permitido contar con información respecto a efectos de sitio. Existen varios estudios disponibles, por ejemplo Verdugo [17], comparó los espectros de respuesta de pseudo-aceleración registrados en el sismo de Maule 2010 con el propuesto en la norma NCh433 concluyendo que este espectro no se ajusta para periodos superiores a 1s. Durante los últimos años, un grupo de profesionales y académicos bajo el alero de la SOCHIGE, propuso la incorporación en el sistema de clasificación el periodo predominante del suelo ( $T_0$ ). En el caso donde los suelos tengan un espesor inferior a los 30m, se sugiere considerar  $V_s < 900$ . Para la

clasificación sísmica cualitativa, se empleó la propuesta elaborada por este grupo la que se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2 – Nueva propuesta de clasificación sísmica.

Categoría	Primer criterio: $V_{s30}$ (m/s)	Segundo criterio: $T_0$ (s)
A	$\geq 900$	$<0.15$ ó HVSR plano
B	$\geq 500$	$<0.30$ ó HVSR plano
C	$\geq 350$	$<0.40$ ó HVSR plano
D	$\geq 180$	$<1.00$ ó HVSR plano
E	$<180$	

Usando este criterio de clasificación, las Fig. 1 (a) y (b), Fig. 2 y Fig. 3 muestran los mapas de zonificación sísmica por localidad.

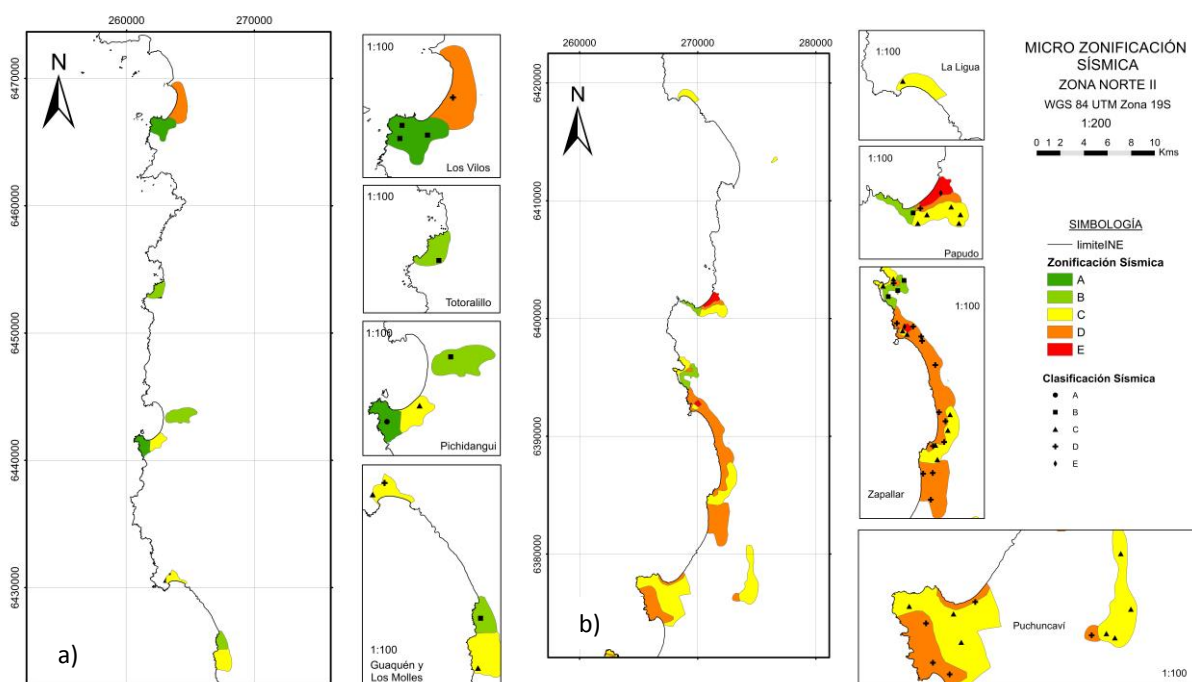


Fig. 1 – a) Microzonificación sísmica del tramo entre Los Vilos y Los Molles b) tramo entre Pichicuy y Puchuncaví



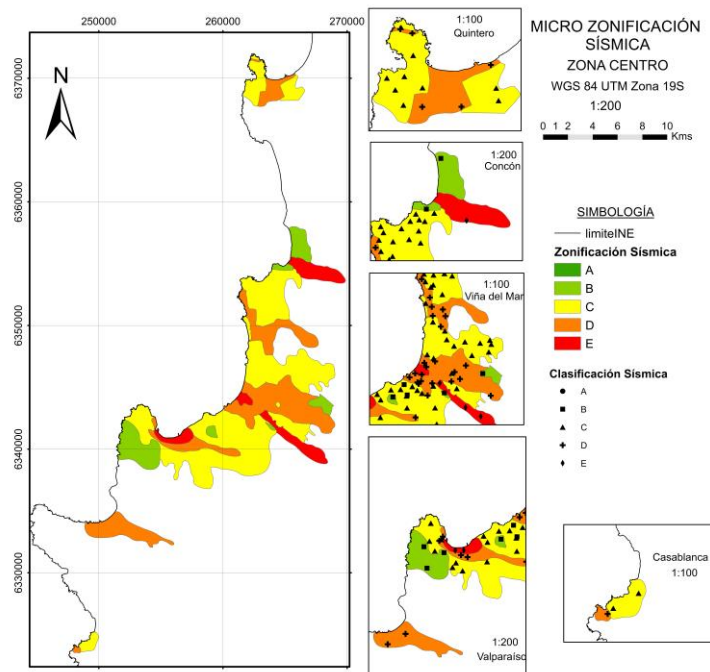


Fig. 2 – Microzonificación sísmica del tramo entre Quintero y Quintay

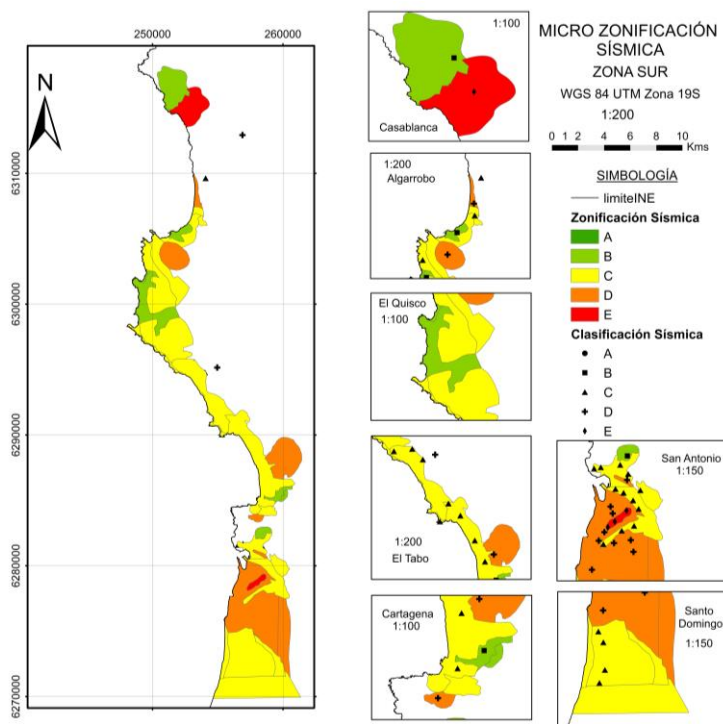


Fig. 3 – Microzonificación sísmica del tramo entre Tunquén y Santo Domingo

## 5 Mapas de amenaza sísmica

Luego de la definición de la microzonificación, a cada una de las zonas se asoció estimaciones cuantitativas de la intensidad del movimiento sísmico empleando como parámetro primario el valor PGA (Peak Ground Acceleration). Como parte del proyecto donde se enmarca esta investigación, se desarrolló un modelo de segmentación-sismotéctonica para todo Chile [2]. La hipótesis central del racional utilizado dice relación con que las zonas de máximo deslizamiento (asperezas) y mínimo deslizamiento (barreras) en Los Andes están controladas por rasgos geológicos a lo largo del plano de subducción del margen continental. Sobre la base de esta segmentación. Se consideraron tres escenarios sísmicos afines con la activación de una o más asperezas contiguas existentes en el segmento de estudio, estos tres escenarios consideran la activación de una, dos y tres asperezas, respectivamente. El escenario 1 corresponde a un evento que debería liberar una energía equivalente a un sismo Mw 8.0, el escenario 2 se asocia a un evento de un tamaño del orden de Mw 8.8 y el escenario 3 corresponde a un sismo excepcionalmente grande de Mw 9.2. La selección de las magnitudes antes indicadas estuvo asociada a la ocurrencia de sismos anteriormente registrados como el de Llole de 1985 (Mw= 8.0), Maule 2010 (Mw= 8.8) y Valdivia 1960 (Mw= 9.2). Estas magnitudes son indicativas, pues el tamaño del sismo dependerá, entre otras cosas, de la amplitud de deslizamiento o *slip* que ocurra a nivel de la aspereza. También dentro del proyecto se desarrolló un modelo de atenuación específico para el segmento que caracteriza cada sitio por el valor del periodo predominante y el de Vs30 [1]. Esta ley fue construida sólo empleando registros sísmicos de subducción registrados en el segmento de estudio, pero incluyendo localidades costeras e interiores. La evaluación de estos tres escenarios descritos con este modelo, permitió asociar a cada sitio caracterizado la mediana del valor del PGA. Definido el indicador de movimiento fuerte (PGA) para cada escenario y localidad, se procedió a relacionar dicho valor cuantitativo con una métrica de percepción de movimiento y de daño esperado asociado. Para ello, se empleó la Escala de Intensidad Instrumental propuesta por [2], actualmente en uso por el servicio geológico de Estados Unidos (USGS) y el Centro Sismológico Nacional (CSN) para la construcción de mapas de intensidad de movimiento. Estos mapas tienen la ventaja de presentar en forma muy simplificada la percepción de movimiento para un público general. Los puntos indican el valor máximo obtenido en la evaluación del modelo de atenuación en términos de la mediana de PGA, mientras que los colores indican regionalmente el valor del índice de amenaza sísmica IAS según se indica en la leyenda Fig. 4, las Fig. 5 (a)-(b) y Fig. 6 (a)-(b) muestran los resultados del Escenario 1.

PERCEIVED SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
POTENTIAL DAMAGE	none	none	none	Very light	Light	Moderate	Mod./Heavy	Heavy	Very Heavy
PEAK ACC.(%g)	<0.05	0.3	2.8	6.2	12	22	40	75	>139
PEAK VEL.(cm/s)	<0.02	0.1	1.4	4.7	9.6	20	41	86	>178
INSTRUMENTAL INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

Fig. 4 – Escala de índice de amenaza sísmica (IAS) empleado para la elaboración de mapas de amenaza sísmica

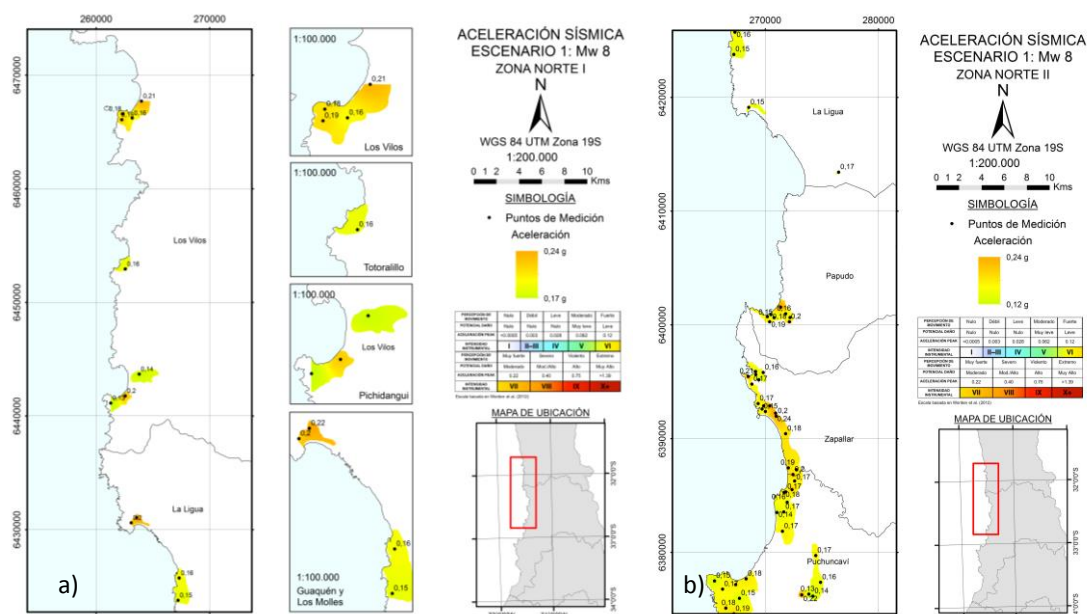


Fig. 5 – a) Mapa de amenaza sísmica del tramo entre Los Vilos y Los Molles b) tramo entre Pichicuy Puchuncaví. Escenario 1

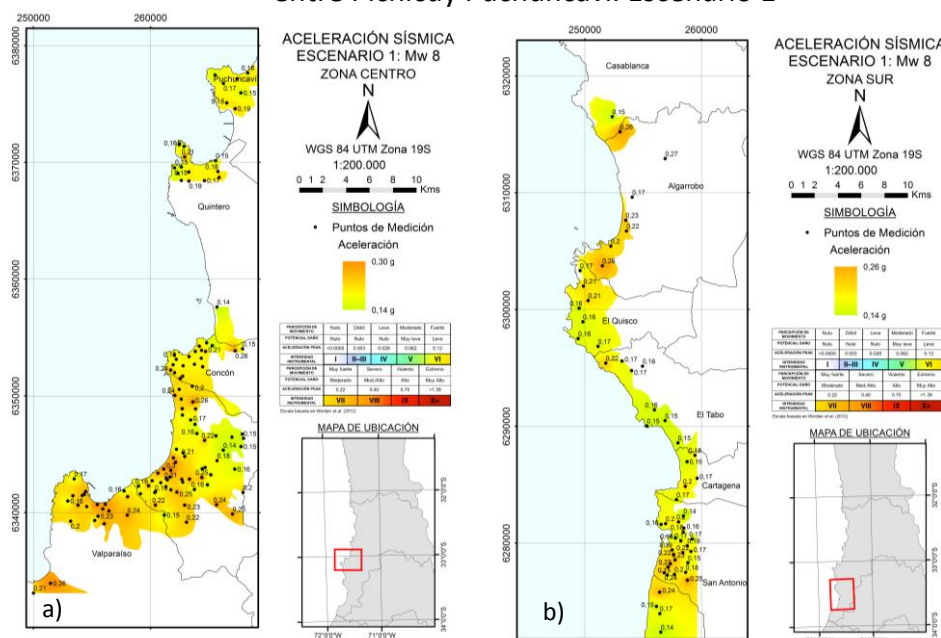


Fig. 6 – a) Mapa de amenaza sísmica del tramo entre Quintero y Quintay b) tramo entre Tunquén y Santo Domingo. Escenario 1





**SOCIEDAD CHILENA DE GEOTECNIA**  
CHILEAN GEOTECHNICAL SOCIETY

Como parte del proyecto donde se enmarca esta investigación, se generó el traspaso de esta información a nueva plataforma de disseminación de información georeferenciada alojada y administrada por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). Esta nueva plataforma, accesible desde el vínculo [sigas.sernageomin.cl](http://sigas.sernageomin.cl), constituye la evolución de la antigua plataforma SIGAS (Sistema de Información Georeferencia de Amenaza Sísmica) desarrollada por los mismos investigadores en un proyecto anterior, lo que ahora estará completamente administrada por el SERNAGEOMIN.

## 6 Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos se observa que hacia el Norte desde Los Vilos hasta la Ligua se encuentran suelos tipo B y C es decir suelos rígidos. Desde Papudo hacia San Antonio se pueden evidenciar además de suelos rígidos depósitos de suelos con categorización D y E especialmente en las poblaciones de: Quintero, Viña del Mar, Valparaíso y San Antonio. Los suelos más blandos y más propensos a amplificar se detectaron en el borde costero de Papudo, en la desembocadura del río Aconcagua (Concón), en la traza de la falla MargaMarga en Viña del Mar, en el borde costero de Valparaíso, en la zona sur de Tunquén y en el centro de San Antonio.

Dentro de los resultados obtenidos, es interesante notar que existen diferencias significativas de PGA esperados en zonas cuyos valores de  $V_{s30}$  son muy regulares. Nos referimos por ejemplo al centro de Viña del Mar, donde se observan diferencias de hasta 40% de los valores esperados solo por efecto del cambio en el periodo de vibrar predominante del sitio. Los resultados detallados presentados en este trabajo ya están accesibles a toda la comunidad a través de la plataforma SIGAS.

Los resultados presentados en este trabajo ponen en evidencia que es posible generar una microzonificación sísmica e indicadores cuantitativos de movimiento sísmico gracias a la recopilación y análisis riguroso de antecedentes geológicos y geotécnicos, la aplicación correcta de técnicas geofísicas sísmicas, junto con el adecuado tratamiento de la base de datos de eventos pasados. Se trata de un esquema trabajo interdisciplinario indispensable para cubrir en forma integral el problema de amenaza sísmica ligada a efectos de amplificación de sitio.

## Agradecimientos

La presente investigación fue posible gracias al proyecto Fondef D10E1027 “Plataforma de Amenaza Sísmica SIGAS: Transferencia Tecnológica a Sernageomin mediante estudio de caso en segmento sismo-tectónico de San Antonio-Los Vilos” financiado por CONICYT.

## 7 Referencias

- [1] Montalva G. *Hito 04, Resultado 1, proyecto (FONDEF +Andes 2.0, 2017)*, 2018. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).



SOCIEDAD CHILENA DE GEOTECNIA  
CHILEAN GEOTECHNICAL SOCIETY

- [2] Worden, C.B., M.C. Gerstenberger, D.A. Rhoades, D.J. and Wald. *Probabilistic relationships between ground-motion parameters and Modified Mercalli intensity in California Bull*, 2012. Seism. Soc. Am. 102(1), 204-221. DOI: 10.1785/0120110156.
- [3] Angermann, D., Klotz, J., & Reigber, C. *Space-geodetic estimation of the Nazca-South America Euler vector*. Earth and Planetary Science Letters, 1999; 171(3), 329-334.
- [4] Tapia, P., Roldán, W., & Villacis, C. *Vulnerabilidad sísmica de las ciudades del norte de Chile: Arica, Antofagasta y Copiapó*. VIII Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Chile;2002.
- [5] Yañez G., Lira, E. *Hito 02, Resultado 1, proyecto (FONDEF D10E1027, 2017)*, 2018.
- [6] Montalva G., Bastías N. y Rodríguez-Marek A. (2017). *Ground-motion prediction equation for the Chilean subduction zone*. Bulletin of the Seismological Society of America. 107.
- [7] Abrahamson N., Gregor N. y Addo K. (2016). *BC Hydro Ground Motion Prediction Equations for Subduction Earthquakes*. Earthquake Spectra. 32(1), 23-44.
- [8] Bastías, N., y Montalva, G.A., (2016). *Chile Strong Ground Motion Flatfile*. Earthquake Spectra. 32. 2549-2566.
- [9] Kværna, T., & Ringdahl, F. *Stability of various fk-estimation techniques, in Semiannual Technical Summary*, 1986. NORSAR Scientific Report 1-86/87.
- [10] Lacoss, R., Kelly, E., & Toksöz, M. *Estimation of seismic noise structure using arrays*, 1986. Geophysics, 34, 21-38.
- [11] Hayashi K. *Development of the Surface-wave Methods and Its Application to Site Investigations*, 2008; Ph.D Dissertation, Kyoto University.
- [12] Aki, K. *Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves, with special Reference to Microtremors*, 1957; Bulletin of Earthquake Research Institute, 35, 415-456.
- [13] Nakamura, Y. *A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface*, 1989; QR Railway Tech. Res. Inst., 30(1), 25-33.
- [14] Pasten, C. *Respuesta sísmica de la cuenca de Santiago*, 2007. Tesis para optar al título de PhD. Universidad de Chile, Chile.
- [15] Leyton, F., Ramírez, S. & Vásquez, A. *Uso y limitaciones de la Técnica de Nakamura en la clasificación sísmica de suelos*, 2012. Congreso Chileno de Geotecnia, Volume VII.
- [16] Stockwell, R. *A basis for efficient representation of the S-transform*, Digital Signal Processing, 2007; vol. 17, no. 1, 371-393
- [17] Verdugo, R. *Microzonificación sísmica según tipos de suelos*, 2016. Sociedad Chilena de Geotecnia. IX Congreso Anual AICE, Santiago de Chile.