



FRECUENCIA PREDOMINANTE DE LOS SUELOS DE VALPARAÍSO-VIÑA DEL MAR Y PROPUESTA DE MICROZONIFICACIÓN PRELIMINAR

Francisco Baquedano
Depto. Ingeniería en Obras Civiles, Universidad Diego Portales
francisco.baquedano@udp.cl

Felipe Leyton
Depto. Ingeniería en Obras Civiles, Universidad Diego Portales
felipe.leyton@udp.cl

Sergio A. Sepúlveda
Depto. de Geología, Universidad de Chile
sesepulv@ing.uchile.cl

RESUMEN

En el presente estudio se muestran los resultados de más de 300 mediciones de microvibraciones hechas en las ciudades de Valparaíso y Viña del Mar, incluyendo la zona de Reñaca-Concón. Utilizando estudios de geología superficial de la zona de estudio, se definen las frecuencias fundamentales de las principales unidades que cubren el área. Dentro de los resultados observados se aprecian importantes contrastes entre el relleno de los valles y los cerros.

INTRODUCCIÓN. Chile es un país con gran actividad sísmica debido a que se encuentra en el contacto subductivo en casi toda su extensión de la Placa de Nazca y la Placa Sudamericana. Se ha observado que la respuesta sísmica del suelo frente a un terremoto de gran magnitud, el daño ocasionado en la superficie no es homogénea en una ciudad (Leyton et al., 2010), es decir, que la amplificación sísmica depende fuertemente de las condiciones locales del sitio (Leyton et al., 2010), esto es lo que se denomina efecto de sitio. Por ello, es importante conocer el comportamiento del suelo en la superficie ante eventos sísmicos y poder caracterizar las propiedades dinámicas de éstos.

Con el fin de evaluar en suelos la posible amplificación sísmica (efecto de sitio) se han desarrollado diversas metodologías que permiten determinar la frecuencia fundamental del suelo que se espera en la superficie de un terreno, tomando en cuenta que los registros de las vibraciones ambientales superficiales son representativas en cierto rango a los eventos sísmicos reales (Soto et al., 2010). Las frecuencias fundamentales de las mediciones de suelo en terreno se estimaron mediante la técnica de Nakamura, además en complemento de la geología superficial con sus respectivas unidades se logró conformar un mapa de microzonificación sísmica preliminar para las ciudades de Valparaíso y Viña del Mar, incluyendo las localidades de Reñaca y Concón.

GEOLOGÍA. La zona de estudio cuenta actualmente con dos mapas geológicos, el antiguo levantado por Álvarez et al. (1964), el cual abarca desde la zona de Playa Ancha hasta la

desembocadura del río Aconcagua en la localidad de Concón y también se cuenta con mapa actualizado por Gana et al. (1996) abarcando un área desde el sector de Playa Ancha hasta el final de la calle Dieciocho Norte, a pocas cuadras del mall de Viña del Mar y de la escuela de la Armada de Chile, ver Figura 1. Las principales unidades geológicas presentes en la zona de estudio son:

- Complejo metamórfico Valparaíso (Pzmv): Rocas metamórficas foliadas pertenecientes al Paleozoico Superior, conformadas de protolito principalmente plutónico y sedimentario en una proporción menor y grabros jurásicos en el sector de Caleta Las Docas.
- Esquistos Anfibolitas (Pc): Unidad de roca con textura lepidoblástica y constituida por oligoclasa levemente alterada a sercicita, cuarzo con extinción ondulosa y anfíbola alterada a biotita y clorita.
- Neis Granítico (Gn): Unidad de roca de color gris claro, grano grueso y con equistosidad. Se presenta en la ciudad de Viña del Mar y la localidad de Reñaca.
- Rocas intrusivas del Paleozoico (Pzmg): Se conforma de tonalitas, granodioritas y monzogranitos de anfíbola-biotita, son rocas de grano grueso a medio. Esta unidad se ubica en Viña del Mar en dos sectores, el primero en las cercanías del sector de Recreo y el segundo en la zona norte del Parque Sausalito.
- Rocas intrusivas Laguna Verde (Jlv): Está conformada de anfibolitas, ortoanfibolitas, gneises anfibólicos, dioritas y monzodioritas foliadas y grabros. Están presentes en los cerros de la ciudad de Valparaíso y Viña del Mar.
- Rocas intrusivas Sauce (Js): esta unidad se conforma de un plutón complejo constituido principalmente de dioritas cuarcíferas; se encuentra presente en las ciudades de Valparaíso y Viña del Mar.
- Rocas intrusivas Limache (Jlt): Está conformada principalmente por tonalitas y granodioritas de anfíbola-biotita. Están presentes en la ciudad de Viña del Mar.
- Estratos de Potrero Alto (Tqpa): Son depósitos sedimentarios de conglomerados, areniscas y limolitas. Se encuentran sobre depósitos de unidades intrusivas paleozoicas a jurásicas, además de estar cubiertos por sedimentos aluviales y suelos cuaternarios. Se presentan en la ciudad de Viña del Mar.
- Formación Navidad (Tn): Se conforma por una secuencia sedimentaria marina fosilífera, constituida por limolitas y areniscas arcillosas con un grano muy fino a muy grueso. Se presentan en las cercanías del Parque Sausalito en Viña del Mar.
- Terrazas de Abrasión (QTt): Es una unidad morfológica de erosión marina, sobre unidades intrusivas paleozoicas y jurásicas. Se presentan en las ciudades de Valparaíso y Viña del Mar.
- Depósitos Marinos (Qm): Es una unidad de sedimentos marinos, conformados por limos, arenas y gravas. Se presentan en la ciudad de Viña del Mar.
- Depósitos Aluviales (Qa): Esta unidad se conforma por sedimentos aluviales que se presentan en zonas planas en la ciudad de Viña del Mar.
- Depósitos litorales y eólicos actuales (Qe): Se constituye de sedimentos de playa, conformados por arenas y gravas de bolones bien redondeados. Se presentan en las ciudades de Valparaíso y Viña del Mar.
- Depósitos Fluviales (Qf): Esta unidad se conforma de sedimentos asociados a cursos fluviales activos. Se presentan en la ciudad de Viña del Mar en el estero Marga Marga.
- Depósitos Eólicos Subactuales (Dunas) (Qd): Se conforma de sedimentos de paleodunas inactivas, constituidos por arenas amarillas. Se presentan en la ciudad de Viña del Mar y las localidades de Reñaca y Concón.
- Arena y grava de playa (Qp): Unidad perteneciente al Cuaternario, la cual se presentan en la localidad de Reñaca.

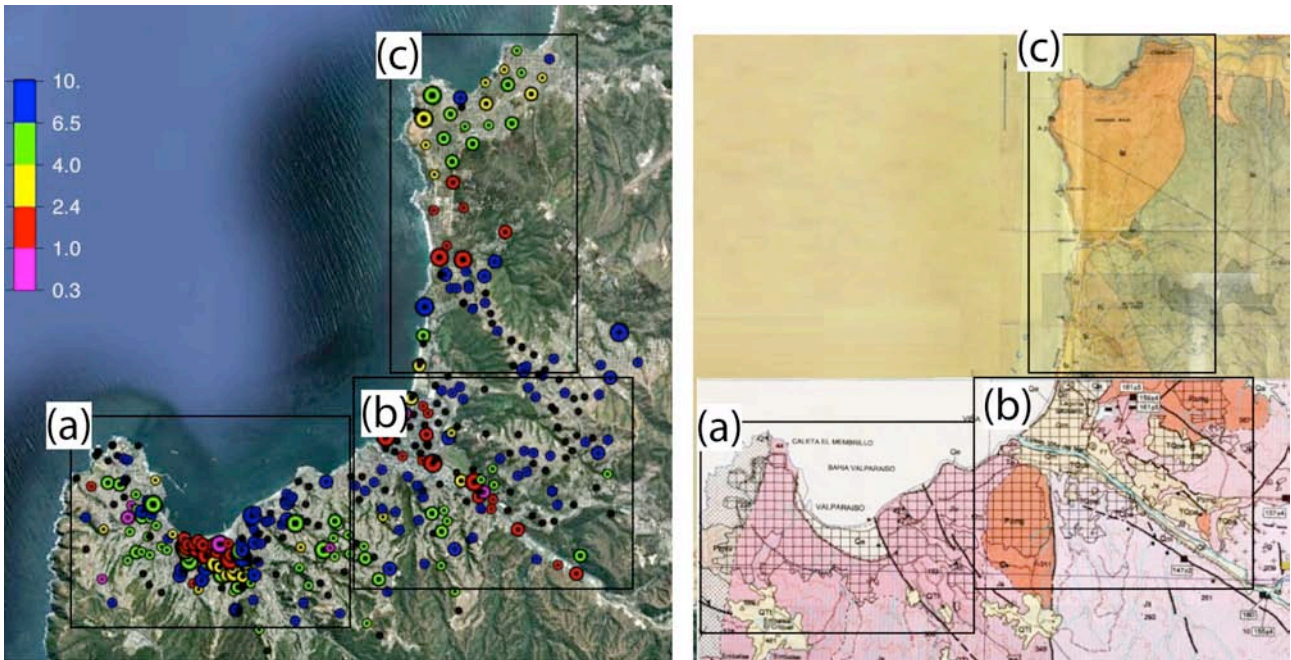


Figura 1: Foto aérea (izquierda) y mapas geológico (derecha) de la zona de estudio; se han marcado los sectores que se analizan más adelante para ayudar a su localización. En la derecha, además, se presentan las estimaciones de la frecuencia predominante, donde el color el proporcional a la frecuencia y la amplitud al valor observado en la curva RHV (ver siguiente sección).

FRECUENCIA PREDOMINANTE. Cada una de las mediciones se realizó con un instrumento de 3 componentes GVB de 4,5 Hz, el cual posee una respuesta confiable hasta 1 Hz, y que ha sido usado exitosamente en este tipo de estudios (Ruiz y Leyton, 2010). En cada punto se grabaron las microvibraciones por un período de 20 minutos, recomendado en estudios de microzonificación (Bard y Grupo SESAME, 2005). Posteriormente, se procedió a procesar los datos siguiendo la misma metodología: se subdivide el largo total en subventanas de 1 min, lo que permite tener resultados confiables hasta 0,05 Hz. Luego, se procede a calcular la transformada de Fourier y suavizarla con un filtro homogéneo en escala logarítmica (Konno y Ohmachi, 1998), con la cual se puede hacer la razón espectral de la horizontal sobre la vertical (RHV). Dado que se utilizan subventanas de 1 min, se obtiene un total de 20 subventanas sin superposición, por lo que es posible estimar el error de cada valor mediante el cálculo de la desviación estándar, lo que se hace en el logaritmo. Tras analizar cada una de las mediciones, ellas pueden clasificarse de acuerdo a la amplitud observada en la razón espectral RHV, oscilando entre 1 hasta sobre 5. Siguiendo los resultados de Leyton et al. (2010), se han clasificado todas las mediciones en las categorías presentadas en la Figura 2, según la amplitud del peak y la frecuencia predominante que marca.

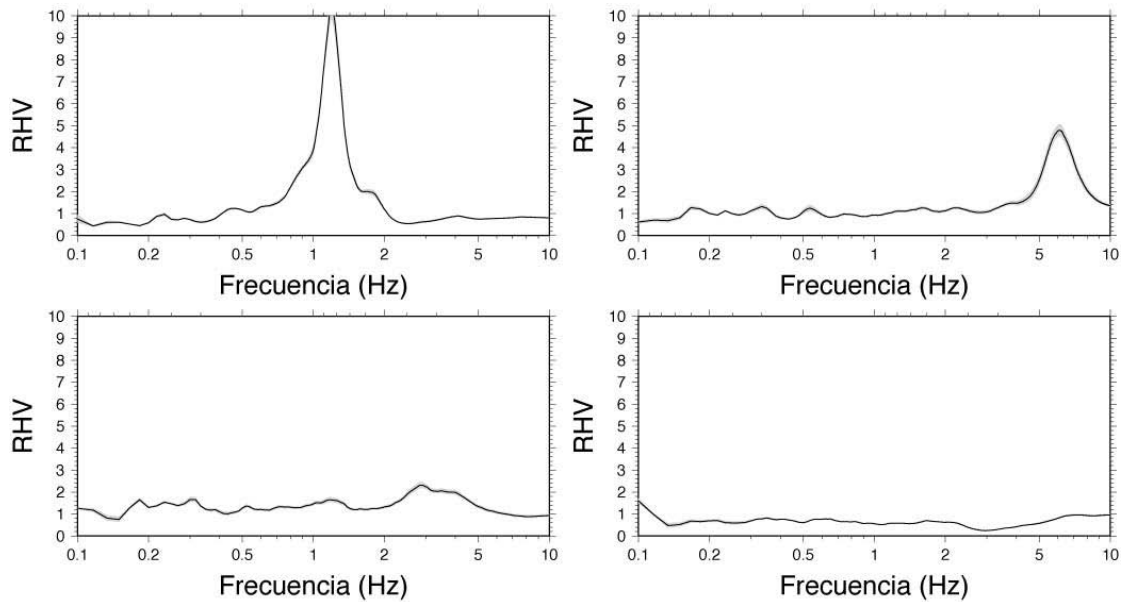


Figura 2: Clasificación de los resultados del cálculo de la razón espectral de la componente horizontal sobre la vertical (RHV). Se aprecia un ejemplo de peak de gran amplitud, otro de amplitud media, el siguiente de amplitud baja y, finalmente, uno ejemplo de curva plana.

Los resultados se presentan en localidades por separado (Figuras 3 a 5), para apreciarlos de mejor forma.

En la ciudad de Valparaíso (Figura 3) se logra observar que en el plano, el cual corresponde al sector del barrio El Almendral y la zona portuaria, está predominado por frecuencias bajas (en colores rojo y morado) coincidiendo con depósitos litorales y eólicos actuales (Qe). Luego, en el sector oriente de la ciudad existe una predominancia de frecuencias muy altas (color azul) y también por curvas planas (en negro), las cuales marcan la presencia de suelos duros pues no existe un gran contraste entre el basamento y el suelo (Leyton et al., 2010); estas mediciones se encuentran sobre rocas intrusivas del Jurásico. En la zona del Cerro Alegre, sector centro poniente de la ciudad se encuentra un área caracterizada por frecuencias altas (en verde), a pesar de estar sobre una misma unidad geológica; éstas frecuencias un poco menores a las antes vistas puede deberse a que se encuentran sobre un regolito tipo maicillo formado por la meteorización de la roca. En la zona céntrica de la ciudad de Valparaíso se observa una transición entre el relleno del plano y los cerros (roca), en donde a medida en que se avanza hacia los sectores altos en roca, las frecuencias van aumentando, pasando por frecuencias predominantes medias (en amarillo), luego frecuencias altas (en verde) y para llegar a frecuencias muy altas (en azul). Finalmente el sector de Playa Ancha no se aprecia un predominio de un sólo rango de frecuencias: en los sectores más bajos, hacia el norte, se observa un número importante de curvas planas, mientras que en los sectores altos se observan algunas frecuencias altas y un par de frecuencias muy bajas (en color morado). Éstas últimas son particulares debido a que la zona de Playa Ancha se encuentra sobre unidad de rocas, luego se piensa que los valores observados a que fueron medidas mal tomadas o que se encuentran sobre pequeños sectores de suelo muy blando, los que no serían representativos de los suelos de ese sector.

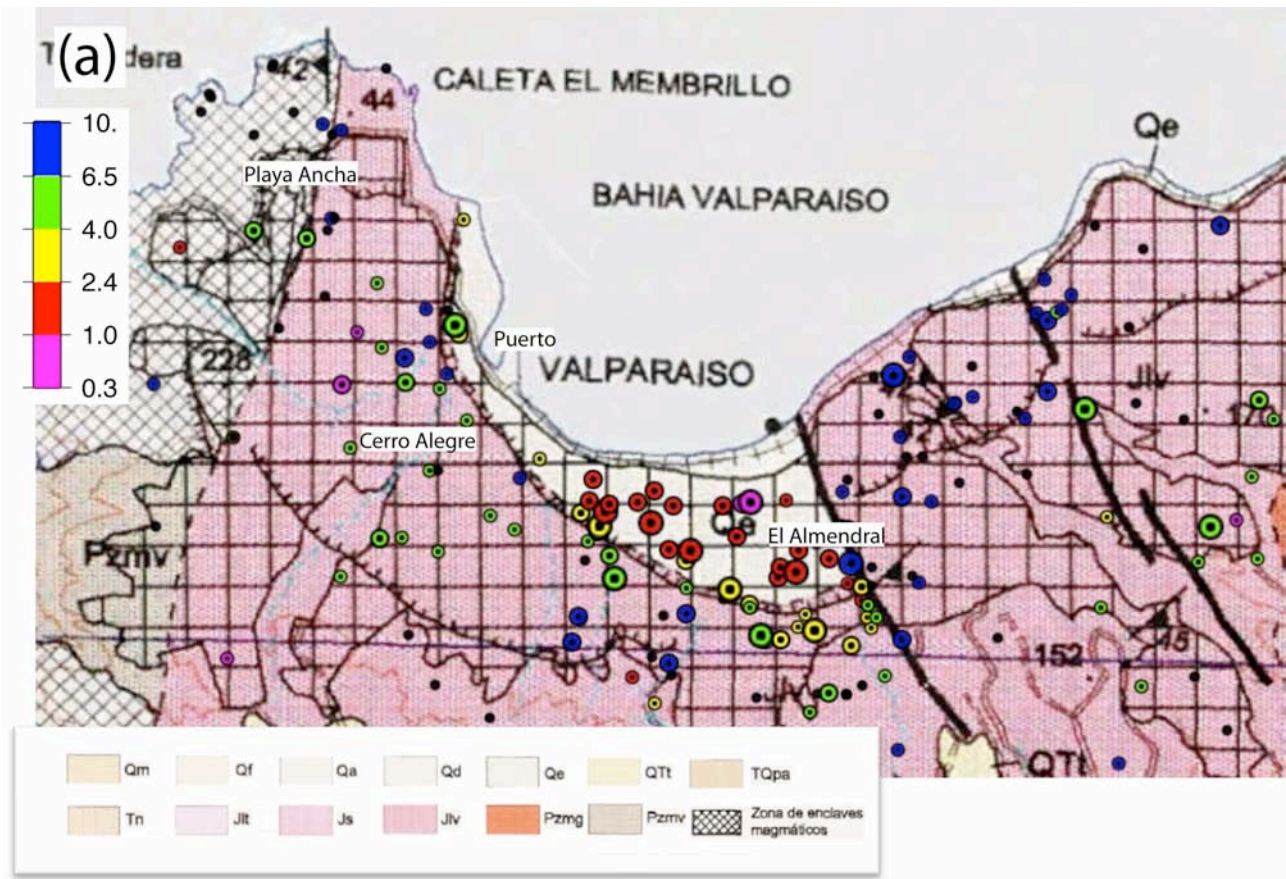


Figura 3: Mapa geológico de la ciudad de Valparaíso (modificado de Gana et al., 1996); los círculos marcan una estimación de la frecuencia predominante, siguiendo la escala de la izquierda, el tamaño es proporcional a la amplitud de RHV.

En la ciudad de Viña del Mar (Figura 4) se puede ver que las unidades de rocas intrusivas del Paleozoico (Pzmg) y del Jurásico, las cuáles bordean exteriormente a la ciudad, se caracterizan por frecuencias muy altas y curvas planas (en azul y negro, respectivamente). En sectores al surponiente del estero Marga Marga (estero Viña del Mar en la Figura 4), se ven dos lagunas de frecuencias altas (en color verde), probablemente debido a que en esa zona se encuentra un regolito producto de la meteorización de la roca en ese lugar. Sobre los estratos de Potrero Alto (TQpa), pertenecientes al Terciario, se encuentran con un gran número de curvas planas. En el sector aguas arriba del Estero Marga Marga (estero Viña del Mar en la Figura 4) hasta su desembocadura, esta predominada por frecuencias predominantes bajas, las cuales se encuentran sobre sedimentos cuaternarios (Qm, Qf). Finalmente, el plano de Viña del Mar, el cuál se encuentra sobre sedimentos marinos cuaternarios (Qm), se logra observar un gran número de frecuencias bajas y pero también un número considerable de curvas planas; esto se traduce en que esta zona tiene un comportamiento heterogéneo.

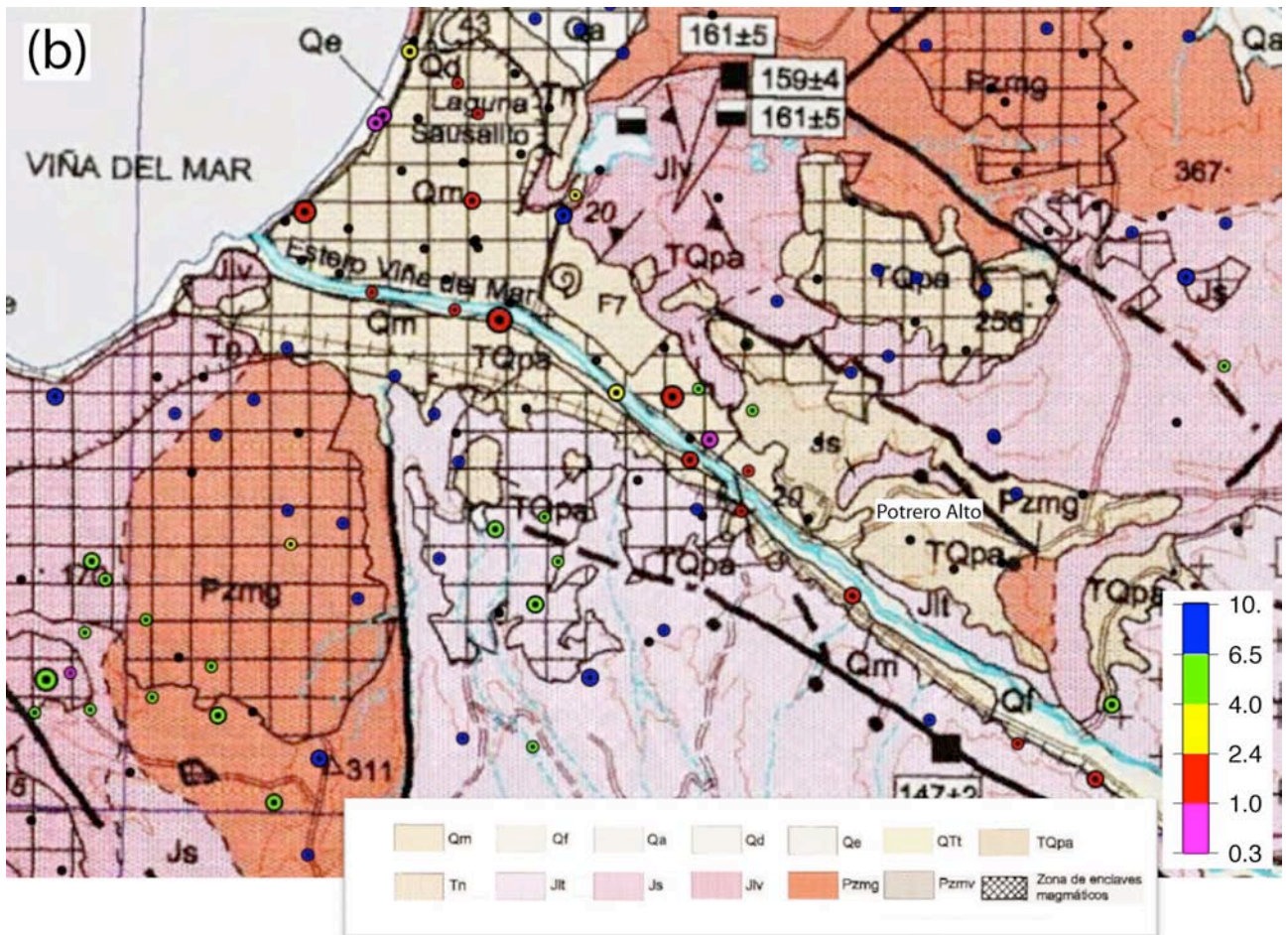


Figura 4: Mapa geológico de la ciudad de Viña del Mar (modificado de Gana et al., 1996); los círculos marcan una estimación de la frecuencia predominante, siguiendo la escala de la derecha, el tamaño es proporcional a la amplitud de RHV.

En las localidades de Reñaca y Concón (Figura 5) se puede apreciar zonas con un predominio de los diferentes rangos de frecuencias. En la zona que une la Población Gómez Carreño hasta las cercanías de Jardín del Mar en Reñaca, existe un claro dominio de curvas planas y frecuencias muy altas (en negro y azul, respectivamente), sobre unidades de roca (Gn y Pc). La zona de enlace entre el estero de Reñaca hasta la entrada a la localidad de Concón se encuentran frecuencias bajas y de gran amplitud (en rojo), estas frecuencias se encuentran sobre arenas eólicas (Qd), pertenecientes al Cuaternario. Finalmente, la localidad de Concón está dominada por frecuencias medias y altas (en amarillo y verde, respectivamente) encontrándose sobre la misma unidad geológica que la localidad de Reñaca. La diferencia en frecuencias predominantes se puede deber a que en esta zona el suelo se encuentra con un mayor grado de compactación o que el estrato de suelo sea de menor espesor al que se encuentra en Reñaca.

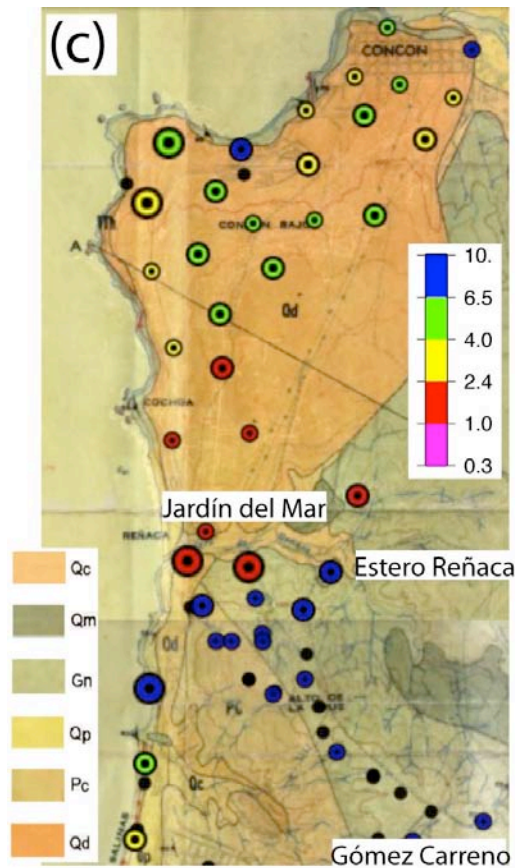


Figura 5: Mapa geológico de Reñaca y Concón (modificado de Álvarez et al., 1964); los círculos marcan una estimación de la frecuencia predominante, siguiendo la escala de la izquierda, el tamaño es proporcional a la amplitud de RHV.

PROPUESTA DE ZONIFICACIÓN SÍSMICA. En consideración de la geología y las frecuencias predominantes obtenidas con microvibraciones, se definen 4 zonas en las que se espera un comportamiento sísmico distinto, a detallar a continuación y se presentan en la Figura 6:

- Zona I: Definida por frecuencias predominantes muy altas sobre los 6,5 Hz y curvas planas, ubicados sobre las unidades de rocas intrusivas y algunos sectores de estratos de Potrero Alto en Viña del Mar.
- Zona II: Se encuentra sobre sectores de rocas intrusivas meteorizadas, inmersos en sectores de Zona I, con formación de regolito, además en sectores donde es necesario diferenciar de la zona III debido a que se encuentra sobre depósitos de suelos blandos como lo es frente a la Armada Chilena y en la localidad de Concón. El rango de frecuencias predominantes que concentra esta zona fluctúan entre los 4,0 y 6,5 Hz.
- Zona III: Corresponde a los sectores que se encuentran ubicados sobre sedimentos blandos pero con frecuencias predominantes que fluctúan entre los 2,4 y 4,0 Hz. En el sector de Valparaíso, corresponde al sector de transición entre sedimentos blandos y la zona rocosa. En Viña del Mar, en las cercanías de la Armada Chilena también se presenta esta zona, y finalmente en la localidad de Concón se desprende de la zona II ya que existen diferencias de rangos de frecuencias sobre una misma unidad geológica.
- Zona IV: Es la zona en donde se presentan las menores frecuencias predominantes (inferiores a los 2,4 Hz) y que se ubican sobre sedimentos sueltos o poco compactados. Estas zonas están presentes en el Valle de Valparaíso, el Valle de Viña del Mar, el estero Marga Marga y el enlace entre Concón y la localidad de Reñaca.

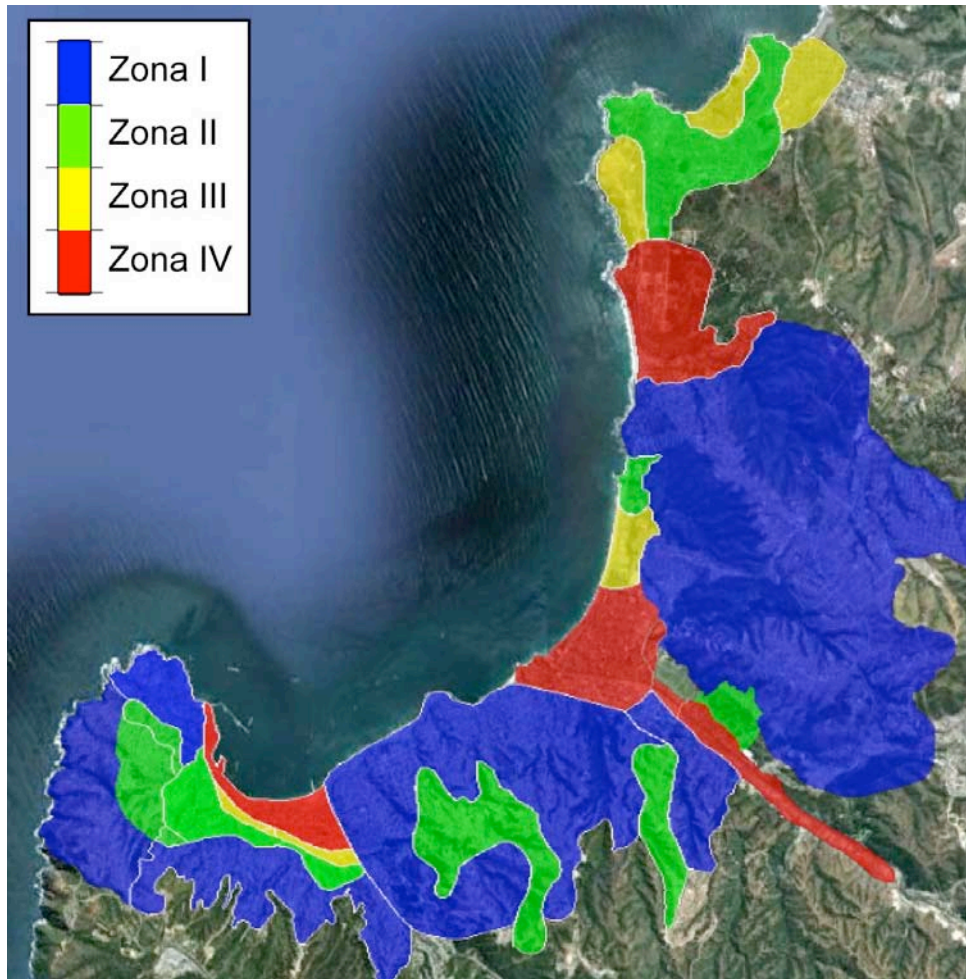


Figura 6: Foto aérea con la zonificación sísmica propuesta, cada color representa una zona sísmica, siguiendo la escala del borde superior izquierdo.

CONCLUSIONES. De acuerdo a las frecuencias fundamentales estimadas mediante el método de Nakamura y la geología superficial del área de estudio se logró definir un mapa de zonificación sísmica preliminar el cuál arrojó como resultado la clasificación de cuatro zonas sísmicas: Zona I, la cuál corresponde a los sectores con frecuencias muy altas y unidades intrusivas principalmente, Zona II, en sectores de meteorización en sectores intrusivos y de frecuencias altas en depósitos de suelos cuaternarios, Zona III, en lugares en que en que existen frecuencias medias en sectores de cuaternarios y finalmente Zona IV, en donde las frecuencias son menores a 2,4 Hz y se ubican sobre depósitos de suelos blandos, el cual sería la zona de mayor vulnerabilidad de acuerdo al efecto de sitio.

Queda la comparación de estos resultados con estudios recientes que incorporan la observación de daños del terremoto del 2010 en la zona de estudio (Carrasco y Núñez, 2012; Castañeda y González, 2012).

AGRADECIMIENTOS. Los autores quisieran agradecer el invaluable aporte de O. Carrasco, C. Núñez, R. Castañeda y A. Gonzáles quienes realizaron el primer grupo de medidas en la zona de estudio. Este estudio fue financiado por el proyecto Fondecyt 1100551. Varias figuras fueron realizadas con el software Google Earth.

REFERENCIAS

- Bard, P.Y., and SESAME-Team (2005) Guidelines for the implementation fo the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations-measurements, processing and

interpretations, in SESAME European research project EVG1-CT-2000-00026, deliverable D23.12, edited, available at <http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr>.

- Carrasco, O., Núñez, C. (2012) Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Viña del Mar, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, en revisión.
- Castañeda, R., González, A. (2012) Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Valparaíso, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, en revisión.
- Gana, P., Wall, R., Gutiérrez, A. (1996) Geología del área Valparaíso-Curacaví: Regiones de Valparaíso y Metropolitana, Escala 1:100.000. SERNAGEOMIN, Mapa geológico N°1.
- Grimme, K., y Álvarez, S.L. (1964) Propiedades de los suelos y áreas geológicas de Valparaíso y Viña del Mar. Instituto de Investigaciones Geológicas de Chile.
- Konno, K., y T. Ohmachi (1998) Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor, *Bull. Seism. Soc. Am*, 88(1), 228-241.
- Leyton, F., Sepúlveda, S., Astroza, M., Rebolledo, S., Gonzáles, L., Ruiz, S., Fonseca, C., Herrea, M., Lavado, J. (2010). Zonificación sísmica de la cuenca de Santiago, Chile. *X Congreso de Sismología e Ingeniería Antisísmica*, Santiago, Chile.
- Ruiz, S. y Leyton, F. (2010). Frecuencia fundamental del suelo observado con acelerogramas del terremoto de Valparaíso 1985 y microvibraciones. *X Congreso de Sismología e Ingeniería Antisísmica*, Santiago, Chile.
- Soto, V., Leyton, F., Maripangui, J. (2010). Consideraciones sobre la técnica de H/V en microvibraciones y resultados preliminares de mediciones en Curicó y Talca, región del Maule. *X Congreso de Sismología e Ingeniería Antisísmica*, Santiago, Chile.