



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**ESTUDIO DE EFECTOS DE SITIO EN LA REGIÓN DE COQUIMBO
EVIDENCIADOS DURANTE EL TERREMOTO DE ILLAPEL 2015**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

JOSÉ RICARDO FERNÁNDEZ LEÓN

PROFESOR GUÍA:
CÉSAR PASTÉN PUCHI

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
SERGIO RUIZ TAPIA
FELIPE LEYTON FLOREZ

SANTIAGO DE CHILE

2017

**RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Ingeniero Civil con mención en
Estructuras, Construcción y Geotecnia.
POR: José Ricardo Fernández León.
FECHA: 31 de mayo de 2017.
PROFESOR GUÍA: César Pastén Puchi.

ESTUDIO DE EFECTOS DE SITIO EN LA REGIÓN DE COQUIMBO PRODUCTO DEL TERREMOTO DE ILLAPEL 2015

Este trabajo tiene como principal objetivo la determinación de efectos de sitio en las localidades de la Región de Coquimbo producidos por el terremoto de Illapel M_w 8.3 de 2015, específicamente en aquellas localidades que cuentan con estaciones sismológicas. Además, se busca relacionar la respuesta sísmica y la distribución de daños durante el terremoto con la geomorfología de los sitios. Para ello se emplea el método de las razones espectrales H/V, o método de Nakamura, con dos tipos de registros. Primero, se utilizan registros de aceleraciones de eventos sísmicos con magnitud moderada a alta ($M_w \geq 5$), ocurridos en un periodo de tres años en torno al evento mayor (2013 a 2016). Luego, se utilizan mediciones pasivas de vibraciones ambientales de entre 20 a 60 minutos de duración. De ambos tipos de registro se obtienen curvas espectrales, que caracterizan sísmicamente a un suelo por medio de su periodo predominante de vibración. Igualmente, se aprovechan los registros sísmicos para generar espectros de respuesta, y múltiples mediciones pasivas simultáneas para la obtención de perfiles de velocidad V_s en profundidad, por medio de métodos de ondas superficiales. Esta información se contrasta con la geología y geomorfología de las localidades para explicar los efectos de sitio observados en cada una. Finalmente, se calculan intensidades MSK a partir de un catastro de daños en viviendas, elaborado por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo, y se comparan con los daños reportados para los terremotos de Illapel 1943 y Punitaqui 1997. Así, los principales resultados de este trabajo revelan que las altas aceleraciones registradas en Monte Patria son atribuibles a efectos de sitio, que el terremoto de Punitaqui 1997 tuvo consecuencias más devastadoras que los de Illapel 1943 e Illapel 2015 y que el bajo nivel de daños experimentados en la Región responde principalmente a la alta presencia de suelos rígidos, como gravas y arenas de depósitos aluviales.

***A la memoria de mi padre,
Ricardo Fernández S. (1964 – 2012)***

¡Cuánto te extraño viejo querido!

AGRADECIMIENTOS

Muchas de las frases siguientes te sonarán “*cliché*”, pero tienen intenciones más que sinceras y expresan fielmente mi sentir al escribirlas. Y aun cuando siempre faltarán las palabras e instancias para agradecer a todos por todo, no puedo dejar de intentarlo.

En primer lugar, agradezco a los profesores. Profe César, por confiar en que podía llevar a buen puerto esta idea, y por insistir en sacarle provecho en otras instancias. Profe Sergio, su sencillez en cada conversación hace sentir que todo trabajo es un aporte, por pequeño que sea. Profe Felipe, por estar pendiente, por contribuir con la experiencia práctica y porque sus palabras presentan un desafío de superación constante.

Luego, mi familia. Mamá y Papá estoy tremendamente agradecido de todo lo que han hecho para formarme y del esfuerzo que le pusieron para darme todo lo que necesité. Siempre dijeron que la educación era el único y más grande regalo y legado que podían dejarme, hoy terminé esta etapa de mi vida y les digo que estén tranquilos y seguros de que lograron su cometido. Papá, me entristece profundamente que no estés para compartir este trabajo contigo, pero sabes que me esforcé al máximo para que te sientas orgulloso de tu hijo, estés donde estés. Después de todo, estoy seguro que Dios te llevó porque tenía planes gigantes y necesitaba al hombre perfecto para llevarlos a cabo. Mamá, probablemente sea muy poca la gente que ha pasado por lo que te tocó vivir, y pese a ello estás de pie como nunca, apoyando a tus hijos a concho siempre, hasta con el desayuno de todos los días. Me siento muy orgulloso y agradecido de ti. Tu fortaleza y ganas de vivir son parte de las cualidades que más admiro, además por supuesto de todos los valores que nos enseñaste. Guatón, hermano amado, de todos el más pendiente de que yo esté bien y eso te lo voy a agradecer siempre. Abuelos, tíos, primos, no caben todos en una sola página, pero sin ustedes este proyecto no habría sido posible.

Bonita, aquí sí van a faltar palabras para agradecer. Muchas gracias por todo el cariño, el apoyo, la incondicionalidad, el esfuerzo y la paciencia que has querido compartir conmigo. Tú eres la persona que más de cerca ha vivido este proceso, proceso que iniciamos y estamos terminando juntos. Tú me apoyaste con todas las frustraciones, las rabias, las penas y te alegraste con todos los avances y logros, si hasta Valdivia fuiste para alentarme. Gracias infinitas, porque sin ti no habría sido capaz de lograr este trabajo.

Pipe, Marito, Seba, Richi C., Nacho, Richi R., Chelo, Maca, Fran ustedes son parte de mi familia, hermanos por elección. Los amo y quiero que sepan que no solo han sido pilares en mi carrera sino que son pilares en mi vida. Han estado en todas, y realmente no tengo cómo agradecerles todo lo que han hecho por mí. Grande IAE por ponerlos en mi vida.

A los Pavez, Vera, Güentulle, Araya, Valenzuela, Azócar y Rivas, les agradezco por el cariño incondicional que han entregado durante tantos años. El apoyo que nos han dado, sobre todo en momentos difíciles, es inmensurable. Cada uno de ustedes ha dejado algo muy especial en mí, algo que es imposible olvidar.

Muchas gracias al “Civil’s Team”: Sole, Franco, Mondaca, Lillo, Rodrigo y Esteban; gracias a los amigos de la U: Pipe L., Ceci, Suso, Mati C., Pame, Ro, Cata P., entre varios. Gracias a los amigos de la Geopecera y también a los de la salita del lab. Todos y cada uno de ustedes son justos merecedores de un agradecimiento, porque de una u otra forma me han apoyado durante estos largos y difíciles pero felices 6 años.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1	
1.1	Objetivos	2
1.1.1	Objetivo General.....	2
1.1.2	Objetivos Específicos	2
1.2	Metodología	2
1.3	Estructura del Trabajo	3
CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4	
2.1	Marco Geológico	4
2.1.1	Geología de la Región de Coquimbo	4
2.1.2	Geomorfología de la Región de Coquimbo	7
2.2	Marco Sismológico	8
2.2.1	Terremoto de Illapel Mw 8.2 de 1943.....	9
2.2.2	Terremoto de Punitaqui Mw 7.1 de 1997	10
2.2.3	Terremoto de Illapel Mw 8.3 de 2015.....	11
2.3	Efecto de Sitio	12
2.4	Clasificación Sísmica de Suelos	12
2.4.1	Norma Chilena NCh433.....	12
2.4.2	Método Razones Espectrales H/V	13
2.4.3	Propuesta de Clasificación de Idini et al. (2016)	14
2.5	Población y Vivienda en la Región de Coquimbo	15
2.5.1	Distribución de Población	16
2.5.2	Distribución de Viviendas	17
2.6	Intensidades Sísmicas en Escala MSK	18
CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN SÍSMICA DE SUELOS	22	
3.1	Estaciones Sismológicas	22
3.2	Eventos Sísmicos Considerados	25
3.3	Campañas de Medición de Vibraciones Ambientales	26
3.4	Determinación Curvas HVSR	28
3.4.1	Resultados de HVSRs.....	29
3.4.2	Determinación Periodo Predominante H/V y Rigidez	35
3.5	Espectro de Respuesta en Aceleraciones	37

3.5.1	Cálculo de los Espectros	37
3.5.2	Espectro de Respuesta por Componentes	37
3.6	Perfiles de Velocidad de Onda de Corte (Vs)	41
3.6.1	Metodología de Inversión	41
3.6.2	Perfiles Vs en Profundidad	44
3.6.3	Cálculo Parámetro V_{s30}	46
3.7	Clasificación de Suelos	46
CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DE DAÑOS		48
4.1	Daños Catastrados producto del Terremoto Illapel 2015	48
4.2	Estimación de Intensidades MSK en viviendas de Adobe	52
4.2.1	Elección del Material de Análisis	52
4.2.2	Intensidades del Terremoto de Illapel 2015	52
4.3	Mapas de Distribución de Intensidades MSK	57
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS		60
5.1	Resumen de Resultados Principales	60
5.2	Degradación de Rigidez	62
5.3	Comparación entre Razones Espectrales H/V y Espectros de Respuesta	63
5.4	Comparación Intensidades MSK entre Terremotos	66
5.5	Determinación de Efectos de Sitio	67
5.5.1	Ciudad de La Serena.....	67
5.5.2	Ciudad de Coquimbo.....	69
5.5.3	Ciudades de Monte Patria y Pedregal	70
5.5.4	Ciudad de Illapel.....	71
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		73
6.1	Conclusiones	73
6.2	Recomendaciones	74
CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA		75
ANEXO A. BASE DE DATOS DE SISMOS CONSIDERADOS		
ANEXO B. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE TROMINOS® EN MEDICIONES DE VIBRACIONES AMBIENTALES		

ANEXO C. MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE VIVIENDAS CATASTRADAS EN ENCUESTA MINVU 2015

ANEXO D. MÉTODO ALTERNATIVO DE EVALUACIÓN DE DAÑOS: ESPECTROS DE CAPACIDAD Y CURVAS DE FRAGILIDAD

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

A pesar de que Chile es uno de los países con mayor actividad sísmica del mundo con al menos un terremoto de magnitud igual o mayor a 8 cada diez años (Campos et al., 2002), la información recabada y el entendimiento de los efectos locales de amplificación sísmica siguen estando limitados por la disponibilidad tecnológica para registrar y analizar su actividad.

En el último tiempo, los terremotos del Maule 2010 ($M_w = 8.8$) e Iquique 2014 ($M_w = 8.2$) han permitido grandes avances en el entendimiento de los fenómenos asociados a los terremotos, además de logros ingenieriles, particularmente en el comportamiento de estructuras civiles (Departamento Ingeniería Civil. Universidad de Chile, 2012; Valdebenito et al., 2015; Saragoni, 2011; Cordero, 2011; de la Llera et al., 2016). En esta misma dirección, es que el reciente terremoto de Illapel 2015 ($M_w = 8.3$) debe ser estudiado para obtener la mayor cantidad de información útil a la comunidad científica, ingenieril y civil, además de fomentar el aprendizaje del fenómeno.

De acuerdo a lo anterior, este trabajo se centra en estudiar los efectos de sitio durante el terremoto de Illapel 2015, es decir, la modificación en amplitud, duración y contenido de frecuencia que experimentan las ondas sísmicas cuando se propagan por depósitos de suelo hacia la superficie (Kramer, 1996). Estos efectos se acentúan con la topografía, la geología y el tipo de suelo en el sitio. Los efectos de sitio se pueden predecir con el uso de las razones espectrales H/V (HVSR), que consisten en el cociente entre el espectro de movimiento horizontal y vertical en la superficie de un sitio. Originalmente, el método fue propuesto para analizar registros de vibraciones ambientales (Nakamura, 1989). Sin embargo, también es posible utilizar registros sísmicos (Lermo & Chávez-García, 1993).

Los efectos de sitio se estudian en 16 localidades de la Región de Coquimbo que cuentan con estaciones sismológicas, considerando registros sísmicos entre los años 2013 y 2016. El análisis es complementado con resultados del método HVSR aplicado a vibraciones ambientales, ampliando el estudio a localidades que no cuentan con estaciones sismológicas activas durante el periodo de estudio, como Ovalle, Los Vilos, Punitaqui y Salamanca. El trabajo conduce a la determinación del periodo predominante de vibración de los distintos tipos de suelo sobre los que se asienta la población de la Región, permitiendo predecir el comportamiento de los mismos ante futuros eventos sísmicos. Este resultado contribuye a la caracterización de los suelos del país, sumándose a trabajos realizados en la cuenca de Santiago (Pastén, 2007; Pastén et al., 2015; Pastén et al., 2016), las ciudades de Curicó y Talca (Leyton et al., 2013) y a la Región de Tarapacá (Pinto, 2016; Becerra, 2014).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

El objetivo general de este trabajo es estudiar los efectos de sitio que se produjeron en las localidades de Illapel, Monte Patria, Punitaqui, Combarbalá, Canela, Salamanca, Los Vilos, Pedregal, Ovalle, Vicuña, La Serena, Coquimbo y Tongoy en la Región de Coquimbo producto del terremoto de Illapel, del 16 de septiembre de 2015.

1.1.2 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos son:

1. Determinar el comportamiento sísmico de los suelos de las localidades de la Región de Coquimbo antes mencionadas mediante las razones espectrales H/V y espectros de respuesta.
2. Recopilar información geológica, geomorfológica y geotécnica de las localidades, que puedan explicar los efectos de sitio observados.
3. Determinar las intensidades sísmicas en la escala MSK a partir de catastros de daños de infraestructura en la zona.
4. Asociar los patrones de daño a los efectos de sitio y verificar si las razones espectrales H/V son capaces de predecir esta relación.

1.2 Metodología

Para cumplir con los objetivos propuestos, se define la siguiente metodología de trabajo.

Recopilación y procesamiento de registros sísmicos de en la Región de Coquimbo.

A partir de la base de datos del Centro Sismológico Nacional (CSN), se obtienen y ordenan todos los registros sísmicos medidos por las estaciones ubicadas en la Región de Coquimbo, entre los años 2013 y 2016, asociados a eventos de magnitud de momento mayor a 5. Luego, mediante rutinas de Matlab®, se procesan empleando la metodología de las razones espectrales H/V, para finalmente agrupar y promediar los resultados por estación, obteniendo curvas de amplitud espectral en función de la frecuencia.

Recopilación y procesamiento de mediciones de vibraciones ambientales.

El CSN con apoyo de los Departamentos de Ingeniería Civil y Geofísica de la Universidad de Chile realizaron estudios de campo en algunas de las comunas y localidades analizadas, donde midieron vibraciones ambientales utilizando sismógrafos de tres componentes Tromino®. Los registros de 20 a 60 minutos de duración se procesaron con el software Geopsy®, con lo cual se obtienen curvas espectrales similares a las calculadas a partir de registros sísmicos, exceptuando la naturaleza de la fuente y el tipo de registro (aceleración).

Recopilación de antecedentes geológicos de las localidades a estudiar.

Se caracterizan geológicamente cada una de las localidades mediante Cartas Geológicas del Servicio Nacional de Minería y Geología (SERNAGEOMIN), desde el plano general de Chile en escala 1:1.000.000 hasta cartas locales de escalas 1:250.000, 1:100.000 y 1:50.000. Se complementa la información con antecedentes y otro tipo de estudios obtenido de memorias de título y tesis de maestría.

Comparación entre resultados de razones espectrales H/V con la caracterización geológica, geomorfológica y geotécnica.

La interpretación de las curvas H/V, calculadas a partir de sismos y de vibraciones ambientales, define el rango de frecuencias en el que las aceleraciones horizontales son amplificadas respecto a las verticales. Se verifica si los resultados tienen relación con la geología del lugar y propiedades del suelo, como la velocidad de onda de corte V_s .

Estimación de intensidades MSK a partir de catastros de daños y correlación con resultados de la comparación anterior.

Finalmente, se procede a la estimación de intensidades MSK mediante adaptaciones chilenas a partir de catastros de daños gubernamentales, tanto locales como centrales, post-terremoto de Illapel 2015. Esta información se compara con la distribución de daños en terremotos anteriores y los resultados de la caracterización sísmica previa para determinar los efectos de sitio en cada localidad estudiada.

1.3 Estructura del Trabajo

Para cumplir con los objetivos del trabajo, y en función de la metodología propuesta para su desarrollo, este documento se estructura en 6 capítulos principales, además de la Introducción y 4 anexos complementarios.

Así, el Capítulo 2 es una revisión bibliográfica de los diversos temas tratados, que intenta servir de marco de referencia para el desarrollo de este trabajo. Luego, el Capítulo 3 tiene por objetivo mostrar los resultados de la caracterización sísmica de los suelos de la Región de Coquimbo, incluyendo de razones espectrales H/V, espectros de respuesta en aceleraciones, perfiles de velocidad de onda de corte en profundidad y la clasificación de suelos. En el Capítulo 4 se aborda el cálculo de intensidades sísmicas mediante adaptaciones chilenas de la escala MSK, a partir de cuantificación de daños y efectos post-terremoto de Illapel 2015. Estos resultados son comparados con información de terremotos históricos para evaluar localidades con potenciales efectos de sitios. Finalmente, el Capítulo 5 corresponde a un análisis de los resultados, donde se analiza la información de los 3 capítulos anteriores para finalizar con las conclusiones del Capítulo 6.

CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Marco Geológico

La Región de Coquimbo se encuentra ubicada geográficamente entre los paralelos 29°10' y 32°10' Sur, aproximadamente, cuenta con una población de 782.801 habitantes y una superficie de 40.580 km² (INE, 2014). Su capital regional es la ciudad de La Serena y se divide en 15 comunas, distribuidas en 3 provincias que se definen de acuerdo a 3 grandes cuencas fluviales de los ríos Elqui, Limarí y Choapa (Figura 1).

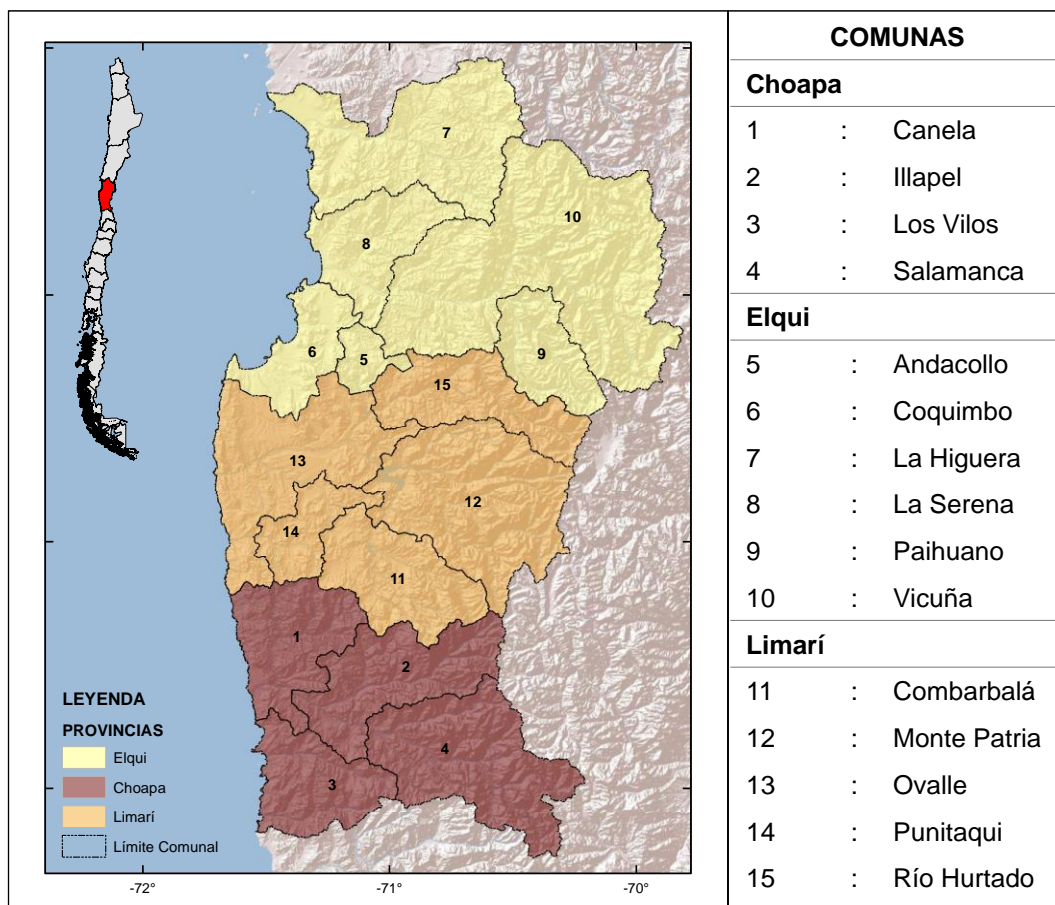


Figura 1 – Mapa de la Región de Coquimbo, con sus 3 provincias y 15 comunas.

2.1.1 Geología de la Región de Coquimbo

La caracterización geológica de la Región de Coquimbo se realizó en base a los levantamientos de equipos de profesionales del Instituto de Investigaciones de Geología y el Servicio Nacional de Geología y Minería, resumidos principalmente en Cartas Geológicas (Aguirre y Egert, 1970; Moscoso et al., 1982; Mpodozis y Cornejo, 1988; Rivano y Sepúlveda, 1991) y Boletines Geológicos (Thomas, 1967). Esta información fue complementada con Memorias de Título que contienen mapeos geológicos (Rosales, 1988; García, 1999).

En términos generales, la geología de la Región manifiesta 3 tipologías diferentes. La primera de ellas es consistente con la presencia de grandes cuencas hidrográficas, que generan sedimentos y depósitos aluviales cuaternarios en sus valles, donde se concentra la población de la depresión intermedia. Existen, además, rocas sedimentarias marinas fosilíferas, de edad terciaria y cuaternaria, que en parte engranan con depósitos aluviales y de terraza de amplia distribución (Thomas, 1967), típicamente encontradas en zonas costeras. Finalmente, la tercera tipología responde a la presencia de ambas cordilleras, que afloran debido a erosión y otros factores, exponiendo numerosos sitios con roca paleozoica a jurásica.

En la Tabla 1 se muestra el resumen de la información geológica en las localidades de interés, junto con el código de la estación sismológica y la unidad geológica correspondiente.

Tabla 1 – Geología de las localidades con estaciones sismológicas.

Comuna	Localidad	Estación	Geología	Descripción
Coquimbo	Las Tacas	C190	Kt (Kg/QTm)	Rocas volcánicas andesíticas con brechas y tobas (riolíticas).
	Coquimbo	C200	Tec (JKg/Qal)	Sedimentos marinos aterrazados, areniscas, calcoarenitas.
	Coquimbo	C220	JKg	Granito jurásico.
	Tongoy	C260	Ja (Qal)	Rocas volcánicas andesíticas y sedimentarias clásticas continentales.
La Higuera	La Higuera	C090	Tega/Qal (Kg)	Gravas de Atacama, poco consolidadas, incluyendo depósitos de río aterrazados.
Vicuña	Cerro Tololo	GO04	Kle (Kv)	Rocas volcánicas andesíticas basálticas y riolíticas, intercalada con sedimentarias.
La Serena	Las Compañías	C010	Qal	Depósitos aluviales cuaternarios.
	La Serena	C330	Qal	Depósitos aluviales cuaternarios.
Combarbalá	Combarbalá	CO02	Qal (Kqmc/Kqmt)	Depósitos aluviales cuaternarios y conglomerados, tobas y brechas.
Monte Patria	Monte Patria	C110	Qal (Kv)	Depósitos aluviales cuaternarios y rocas volcánicas.
	Pedregal	CO03	Qac (Kv/ah)	Sedimentos aluviales y coluviales, depósitos de relleno de valles.
Ovalle	Ovalle	-	Qal/Qc (Kra/Ka)	Depósitos aluviales cuaternarios y sedimentos continentales.

Comuna	Localidad	Estación	Geología	Descripción
	Limarí	C130	Qal (Qc)	Depósitos aluviales cuaternarios y sedimentos continentales.
	Angostura	CO06	Jgd (Jdn)	Granito a granodiorita, diorita gnéisica.
Punitaqui	Punitaqui	C050	Qc (Kg)	Sedimentos continentales y granito.
Canela	Canela Baja	C120	Qc/Jmi4	Sedimentos continentales con intrusivos (granodioritas y tonalitas).
Illapel	Illapel	C070	Qac/Tc (Ki1)	Sedimentos aluviales y coluviales con conglomerados, areniscas, brechas, limolitas.
Los Vilos	Los Vilos	-	Qal (Jmi1/Dca)	Depósitos aluviales además de lutitas, areniscas y estratificación gradada. Monzogranitos y sienogranitos.
Salamanca	Salamanca	-	Qac (Ki1)	Sedimentos aluviales y coluviales junto con granodioritas (intrusivos).

NOTA: (-): Localidades sin estación sismológica o que se encontraba inactiva en el periodo de estudio.

2.1.2 Geomorfología de la Región de Coquimbo

De acuerdo a la descripción geomorfológica realizada por Börgel (1983) en la Figura 2, se tiene que la Región de Coquimbo está caracterizada fundamentalmente por la presencia de dos grandes unidades morfológicas. Ellas corresponden a las uniones de ambas cordilleras y las planicies litorales.

Las primeras se manifiestan por la fuerte presencia de cordones transversales montañosos que atraviesan desde la Cordillera de Los Andes a la Cordillera de la Costa, promoviendo la formación intensa de valles en la Depresión Intermedia. Estos cordones adquieren alturas entre 600 y 1.000 m.s.n.m., en disposición E-W principalmente, y se ven originados en la erosión producto de la acción de quebradas y ríos, destacando 3 cuencas principales (Elqui, Limarí, Choapa). Así, la Región se caracteriza por presentar una compleja faja interna de relieve montañoso de 50 km de ancho aproximadamente, además de pequeñas cuencas tectónicas y corredores longitudinales N-S (Börgel, 1983).

Por otra parte, las planicies litorales pueden ser de 3 tipos: fluviales, marinas o fluvio-marinas. Esta morfología alcanza un desarrollo de 30 km de ancho en la sección entre La Serena y Tongoy, condición adquirida gracias a la desembocadura de ríos, con alto nivel de deposición de materiales, promoviendo la formación de dunas y playas continentales (Börgel, 1983).



Figura 2 – Geomorfología Región de Coquimbo esquematizada (Modificado de Börgel, 1983).

2.2 Marco Sismológico

La Placa de Nazca subducta bajo la Placa Sudamericana en dirección Oeste-Este en la mayoría de la extensión del territorio nacional. En particular, esta condición sismogénica se manifiesta en la Región de Coquimbo con un par de situaciones distintas al resto del país.

En primer lugar, la dirección de movimiento de la Placa de Nazca posee una orientación nororiente y una velocidad de avance cercana a los 76 mm/año (DeMets et al., 2010). Esta situación puede observarse en la Figura 3a. Por otra parte, la sección ubicada más allá del contacto entre las placas, a aproximadamente 100 km de profundidad, tiende a volverse subhorizontal por una extensión cercana a los 250 km, para finalmente continuar su descenso al manto más allá de Los Andes, bajo territorio argentino (Pardo et al., 2002). Esta condición de horizontalidad caracteriza a la zona sísmica con: (1) un contacto interplacas fuertemente acoplado, (2) corteza continental altamente comprimida con sismicidad de arco inverso y acortamiento de la corteza y (3) ausencia de complejos volcánicos cuaternarios activos (Pardo et al., 2002).

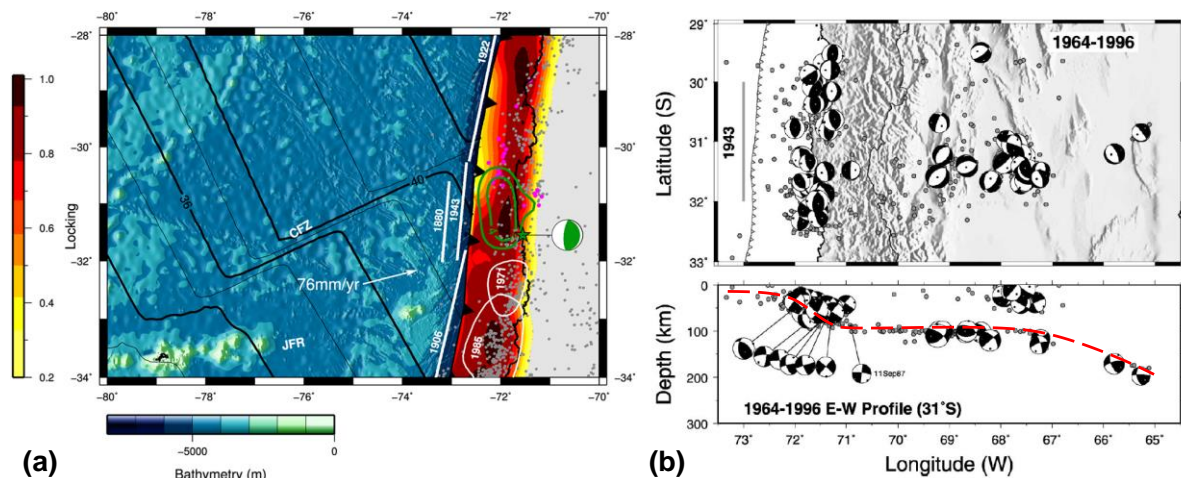


Figura 3 – Escenario subductivo de la Placa de Nazca bajo la Sudamericana y sismicidad histórica de la Región de Coquimbo. (a) Velocidad y orientación del movimiento (Tilmann et al., 2016) y (b) perfil transversal en profundidad a partir de localización de sismos (modificada de Pardo et al., 2002).

La sismicidad histórica de Chile ha sido compilada por varios autores a lo largo del tiempo, quienes han indagado incluso en referencias dejadas por los distintos asentamientos españoles presentes en el país desde mediados del siglo XVI para completar la información. Dentro de ello, Ruiz et al. (2016) explican que la sismicidad de Chile Central está dominada por el mega-terremoto de 1730 (Udías et al., 2012), al que siguen varios eventos de magnitud M_w mayor a 8.0, particularmente en los siglos XIX y XX. En el límite norte del gran terremoto, lugar donde se emplaza desde 1544 la ciudad de La Serena, se reporta escasa información respecto a daños en edificaciones producto de terremotos, y solo hay referencia a pequeños tsunamis en 1730, 1849, 1880 y 1922. Esta situación es consistente con el bajo nivel de acoplamiento de deformaciones en el borde superior de la placa detectado con instrumentos GPS, analizados para el estudio del terremoto de Illapel 2015. En cambio, el borde sur de la ruptura de 2015 muestra un alto nivel de acoplamiento, al emplear la misma técnica (Ruiz et al., 2016).

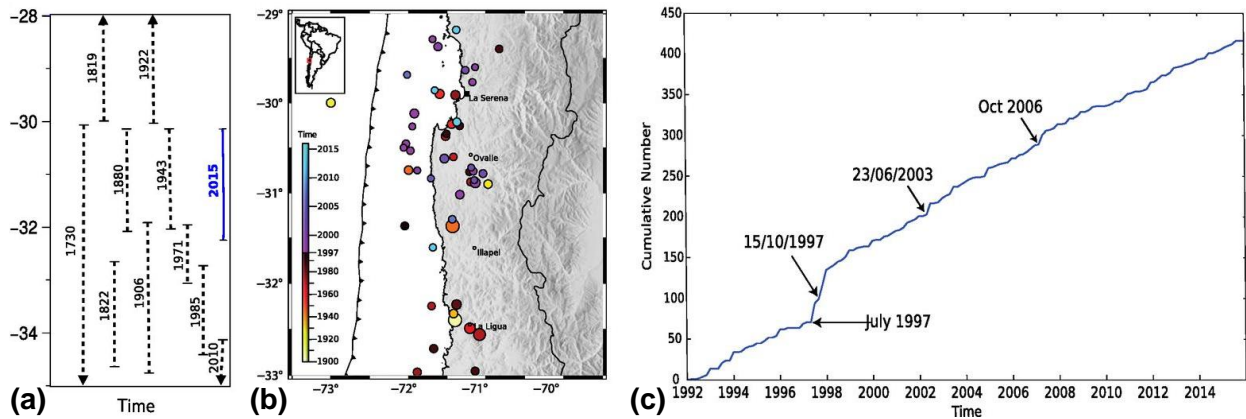


Figura 4 – Distribución espacial y temporal de (a) mega-terremotos históricos con $M_w \geq 8.0$ en la zona de interés y (b) terremotos de magnitud $M_w \geq 6.0$ previos al terremoto de Illapel 2015. (c) Tendencia acumulada de los mostrados en (b) (modificado de Ruiz et al., 2016).

De la Figura 4a es posible deducir que la zona de ruptura del terremoto de Illapel 2015 se ubica en la misma posición donde se provocaron los terremotos de 1880 y 1943, y de acuerdo a los estudios realizados, incluso tendrían magnitudes similares además de un espaciamiento temporal relativamente constante.

Respecto al objetivo del presente trabajo, son de mayor importancia los terremotos de Illapel 1943 y Punitaqui 1997. El primero de ellos se estima que fue un evento de características similares al de 2015, lo que permite mantener constante la fuente sísmica en el análisis de daños. El segundo, que si bien es de naturaleza completamente distinta y de menor magnitud, causó daños mayores en la Región, los que fueron estudiados por Díaz (2001), Piñones (2002) y Pardo et al. (2002). Por estas razones, los 3 eventos mencionados se presentan a continuación con mayor detalle.

2.2.1 Terremoto de Illapel M_w 8.2 de 1943

Este terremoto ocurrió el día 6 de abril de 1943, a las 12:07 hora local, con epicentro ubicado costa afuera, frente a la desembocadura del río Limarí, y a una profundidad de 55 km aproximadamente (Piñones, 2002). La magnitud fue $M_w = 8.2$, mientras que la ruptura tuvo una extensión de 200 km, entre los paralelos $30^\circ S$ y $32^\circ S$ (Beck et al., 1998). De acuerdo con la información aportada por Beck et al. (1998) y Hatori (1968), este terremoto habría ocasionado un tsunami en la bahía de Coquimbo de 4 a 5 m de altura, además de una ola de entre 10 a 30 cm de altura que llegó a Japón.

El segmento que se rompe es reconocido como una parte de la gran ruptura del terremoto del 8 de julio de 1730 y coincidente con la zona de ruptura del terremoto del 15 de agosto de 1880 (ver Figura 3 y Figura 4a). De acuerdo con la modelación del terremoto de 1943, mediante el método de forma de la onda P realizada por Beck et al. (1998), tanto la duración como el momento sísmico estimado sugieren que el sismo corresponde a la ruptura de una aspereza uniforme.

En cuanto a los daños provocados, lamentablemente no existen suficientes datos confiables catastrados sobre los efectos que produjo el terremoto de Illapel 1943 en las viviendas de la Región de Coquimbo para aplicar alguna metodología de cálculo de intensidades. La información disponible solo se reduce a diarios regionales y nacionales

que indagaron el evento en los días posteriores, pero que no representan datos técnicamente aptos para generar una clasificación de daños tal y como se requiere en la escala MSK.

Pese a lo anterior, en el mapa de isosistas de Greve (1946) se indica que el máximo de valor de intensidad asociada al terremoto de Illapel de 1943 es V grados (en la escala chilena que toma valores desde I a VI), localizada en la zona comprendida por las ciudades de Ovalle, Combarbalá, Illapel y Petorca. De acuerdo con Piñones (2002) la intensidad V en aquella escala es equivalente a IX en escala MSK. Sin embargo, el mismo autor desmiente el hecho de que los efectos hayan alcanzado tal valor y explica que la intensidad de este terremoto no debió superar los VIII grados en MSK en la ciudad de Ovalle. La afirmación anterior se basa en un estudio que catastró una veintena de viviendas de albañilería simple con techumbre de tejas (tipo B) en relativo buen estado pertenecientes a la Población Obrera de Ovalle, construidas a partir de 1925, y que reveló que para obtener una intensidad de grado IX estadísticamente más del 50% de ellas debió haber sufrido daño severo.

Sin embargo, las observaciones en terreno dan cuenta de una homogeneidad tanto en la integridad de las viviendas individualmente como en su distribución de ubicaciones en el barrio, inclusive manifestando escasa evidencia de reparaciones mayores en su estructura, lo que a su vez implica que el nivel de daños provocados por el terremoto de Illapel 1943 no debió ser mayor a 3 en la definición de daños MSK (Tabla 4) y, por ende, Piñones (2002) logró calcular una intensidad VIII en la ciudad.

2.2.2 Terremoto de Punitaqui Mw 7.1 de 1997

Entre julio de 1997 y enero de 1998 ocurrieron 7 eventos de magnitud $M_w > 6$ en un área que se extiende más de 100 km entre los paralelos 30°S y $31,5^\circ\text{S}$, zona que se entrelaza con la parte norte de la ruptura del terremoto de Illapel 1943. La secuencia puede ser descrita como dos enjambres sísmicos. El primero de ellos, en julio de 1997, corresponde a 4 eventos $M_w > 6$ que registraron mecanismos focales consistentes con fallas de tipo *thrust* y un patrón de propagación en cascada hacia el sur dentro del contacto de las placas (Lemoine et al., 2001).

Luego, el 15 de octubre de 1997 a las 22:03:30 hora local se produjo un terremoto de tipo intraplaca de profundidad intermedia (68 km) al interior de la Placa de Nazca, que desencadenó el segundo enjambre (Lemoine et al., 2001). Este terremoto responde a una falla por compresión producto de la flexión de la placa oceánica en esta zona. El epicentro se ubicó a unos 10 km al norte de Punitaqui, con coordenadas $31,02^\circ\text{S}$ y $71,23^\circ\text{W}$, y se registró una magnitud $M_w=7.1$. La estación más cercana al epicentro (70 km), ubicada en Illapel, logró medir 0.35g de aceleración máxima en la componente horizontal $N70^\circ\text{E}$ (Pardo et al., 2002).

De acuerdo a reportes de ONEMI y Carabineros, el sismo fue sensible desde Taltal (II Región) hasta Angol (IX Región) con intensidad II en escala de Mercalli Modificada (Díaz, 2001). En cuanto a las consecuencias, se registraron 8 personas fallecidas, cerca de 5.000 casas destruidas y otras 15.700 dañadas, además de caídas de taludes tanto de roca como de suelo.

Lo anterior, junto con la distribución de isosistas generadas a partir de los daños, indican que el alto porcentaje de destrucción del evento puede deberse a 3 causas principales: (1) la proximidad del epicentro, (2) la pobre calidad de las casas de adobe de la zona y (3) probables efectos locales de amplificación en los distintos sitios (Pardo et al., 2002).

Se estimaron intensidades MSK de hasta IX en la ciudad de Punitaqui, de acuerdo a la investigación de Díaz (2001), quien usó datos levantados en dos encuestas de terreno. La primera fue realizada por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile con datos ajustados a los criterios definidos por Astroza y Monge (1989). La segunda fue desarrollada por la Intendencia Regional mediante un instrumento análogo al empleado por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo, que cuenta con 5 niveles de daños con objeto de asignación de recursos para contención social y reconstrucción.

Los valores fueron determinados sobre viviendas tipo A en toda la Región. No se expondrán en formato de tabla por su extensión y por encontrarse detallados en el trabajo antes mencionado. Pese a ello, se cruzó la información de localidades de aquella época con las indicadas en la cartografía del Pre Censo 2011, de modo tal que se pudo generar un mapa regional de intensidades en que se exhibe en la Sección 4.2.

2.2.3 Terremoto de Illapel Mw 8.3 de 2015

De acuerdo con Ruiz et al. (2016), este evento de magnitud $M_w=8.3$ ocurrió a las 19:54:31 hora local (UTC 22:54:31), con un epicentro de coordenadas $31,5^\circ\text{S}$ y $71,7^\circ\text{W}$, punto que se encuentra a 37 km al NO de la ciudad de Los Vilos. La profundidad del sismo es de 23,3 km, por lo que se deduce que corresponde a un terremoto de tipo interplaca trust en el contacto subductivo entre la placa de Nazca y Sudamericana.

La zona norte de la ruptura del mega-terremoto de 1730, manifestaba un gap sísmico de eventos de magnitud mayor a $M_w 8.0$ hasta antes del terremoto de Illapel 2015, considerando los terremotos de 1880 y 1943. Por otra parte, la Región cerca de Illapel, se encontraba con un acoplamiento de deformaciones cercano al 60%. Lo anterior, sumado a que el mega-terremoto de Maule 2010 provocó un cambio en el campo de velocidades de las placas, que a su vez generó un aumento del acoplamiento en otro 15% en la zona cercana a los 32°S , parece ser la causa que logra desencadenar el evento sísmico del 16 de septiembre de 2015 (Ruiz et al., 2016), puesto que la ruptura tiene una propagación con dirección norte, de acuerdo a la distribución de réplicas (Heidarzadeh, 2016).

Justo después del terremoto de Punitaqui 1997, en la Región de Coquimbo comenzó un aumento en la tasa de sismicidad. Sin embargo, en las semanas previas al terremoto del 16 de septiembre de 2015 no se observó ningún indicio de anomalía en esta situación, ni la presencia de enjambres, a diferencia de lo que ocurrió antes de gatillarse el terremoto de Iquique 2014 (Ruiz et al., 2016).

El evento produjo daños principalmente a las viviendas, mientras el tsunami trans-Pacífico posterior destruyó gran parte del borde costero de la ciudad de Coquimbo (Candia et al., 2017), con olas que alcanzaron máximos entre 4 y 5 m de altura cerocresta en la costa local y cerca de 80 cm en Japón (Heidarzadeh, 2016). El terremoto y posterior tsunami dejaron en total 13 víctimas fatales (GEER, 2015), además de 6.763

viviendas siniestradas en distintos niveles de daños (MINVU, 2016). De acuerdo con Candia et al. (2017) el daño en la infraestructura fue acotado, pese a la magnitud del evento y sus réplicas. Solo se encontró evidencia de un muro de contención de 30 m de largo y 4.5 m de alto que volcó debido a una mezcla de efectos hidrodinámicos inducidos por el tsunami y el movimiento del terremoto cerca del puerto de Coquimbo. El Ministerio de Obras Públicas reportó 8 puentes con algún tipo de falla (6,5% del total en la Región), cuyo patrón de falla más común fueron asentamientos en los estribos y *lateral spreading* menor. El fenómeno de licuefacción fue observado de forma aislada, pero de todas formas provocó daños locales en puentes, caminos, tuberías de agua potable, líneas eléctricas y edificios en las ciudades de La Serena, Coquimbo y Tongoy. Finalmente, se presentaron deslizamientos de taludes tanto de suelo como de roca en gran parte de las rutas vehiculares de la Región, los que se encontrarían asociados a la zona de deslizamiento cosísmico del terremoto (Candia et al., 2017; GEER, 2015).

2.3 Efecto de Sitio

De acuerdo con la Red Sísmica del Pacífico Noroeste (*"Pacific Northwest Seismic Network, PNSN"*) el efecto de sitio es aquella modificación de la onda sísmica entre el basamento rocoso y la superficie, debido a condiciones geológicas locales. Particularmente, existen 5 factores que influyen: (1) la rigidez del depósito de suelo o roca, (2) el espesor total entre superficie y basamento rocoso, (3) la geomorfología de la cuenca o valle donde se encuentra el sitio (Frankel et al., 2002), (4) el potencial de falla del suelo, ya sea por licuefacción y/o deslizamiento de tierra; y (5) la topografía, referente a la evidencia empírica de que el movimiento en colinas se percibe en grados de intensidad superiores a aquellos sitios planos (Geli et al., 1988).

2.4 Clasificación Sísmica de Suelos

Con la finalidad de establecer parámetros objetivos y aplicables al contexto que permitan comparar los resultados obtenidos, evaluar la calidad del subsuelo y lograr verificar la hipótesis inicial, se decidió emplear criterios específicos de clasificación de suelos. Así, se consideró la normativa vigente para el diseño sísmico de edificios en Chile que contiene una tipificación basada en criterios mecánicos, además de una propuesta reciente que muestra un ordenamiento en función del periodo predominante de vibración de un depósito.

2.4.1 Norma Chilena NCh433

La normativa vigente en Chile de clasificación de suelos para el diseño sísmico de edificios corresponde a la norma NCh 433 Of. 96 Mod. 2009. La norma define tipos de suelos en función de propiedades que posteriormente tienen implicancia en la definición de un espectro de diseño. Luego del terremoto del Maule 2010 se introdujeron algunas modificaciones a la norma, particularmente en la clasificación de suelos, mediante el Decreto Supremo N° 61 (2011). La Tabla 2 muestra la clasificación que se encuentra en el DS61 y que rige el ejercicio de la ingeniería actualmente. El parámetro dinámico más relevante en la clasificación de suelos es la velocidad de onda de corte promedio de los 30 metros superiores del terreno V_{s30} .

Tabla 2 – Tipificación de suelos de la norma NCh433 Of. 96 Mod.09 considerando las modificaciones del Decreto Supremo 61 (DS61, 2011).

Suelo Tipo	V_{s30} (m/s)	RQD	q_u (MPa)	N_1 (golpes/pie)	S_u (MPa)
A Roca, suelo cementado	≥ 900	$\geq 50 \%$	≥ 10 ($\varepsilon_{qu} \leq 2\%$)		
B Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme	≥ 500		$\geq 0,40$ ($\varepsilon_{qu} \leq 2\%$)	≥ 50	
C Suelo denso o firme	≥ 350		$\geq 0,30$ ($\varepsilon_{qu} \leq 2\%$)	≥ 40	
D Suelo medianamente denso, o firme	≥ 180			≥ 30	$\geq 0,05$
E Suelo de compacidad, o consistencia media	< 180			≥ 20	$< 0,05$
F Suelos Especiales	*	*	*	*	*

NOTA: V_{s30} : Velocidad de onda de corte promedio de los 30 metros superiores del terreno. **RQD:** *Rock Quality Designation*, según norma ASTM D 6032. q_u : Resistencia a la compresión simple del suelo. ε_{qu} : Deformación unitaria desarrollada cuando se alcanza la resistencia máxima en el ensayo de compresión simple. N_1 : Índice de Penetración Estándar normalizado por presión de confinamiento de 0,1 MPa. Aplicable solo a suelos que clasifican como arenas. S_u : Resistencia al corte no-drenada del suelo.

De acuerdo con el detalle del DS61, se consideran “Suelo Especiales (TIPO F) a aquellos que presentan singularidades en su comportamiento mecánico y que por tanto requieren estudios geotécnicos especiales, como por ejemplo en casos de suelos licuables, colapsables, orgánicos, sensitivos y turba, entre otros”.

2.4.2 Método Razones Espectrales H/V

El método de razones espectrales de Nakamura o H/V (Nakamura, 1989) consiste en estimar el periodo predominante de vibración de un suelo por medio de la determinación de una función de transferencia equivalente S_{TT} , calculada a partir de los movimientos horizontal y vertical en la superficie del depósito, que se define como:

$$S_{TT} = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} \quad (1)$$

Donde S_{HS} corresponde a la amplitud espectral del movimiento horizontal y S_{VS} es la amplitud espectral del movimiento vertical, ambos en la superficie del depósito. De acuerdo con los supuestos considerados por Nakamura (1989) esta técnica puede ser aplicada a partir de registros de ruido ambiente artificial, aun cuando este ruido se propaga principalmente como ondas superficiales.

Al resultado de la Ecuación 1 se le conoce como HVSR (o razones espectrales H/V) y el periodo asociado a la mayor amplitud de esta curva se le denomina periodo predominante de vibración del suelo (T_P).

2.4.3 Propuesta de Clasificación de Idini et al. (2016)

Esta nueva propuesta fue concebida como un desarrollo de ecuaciones de predicción de movimiento fuerte del suelo ("*Ground Motion Prediction Equations*", *GMPE*) para la zona de subducción chilena y tiene como propósito servir en análisis de riesgo sísmico (Idini et al., 2016). Para su desarrollo fue necesario considerar el efecto de sitio, lo que se abordó creando una clasificación de suelos basada en la adaptación de la técnica de Nakamura (1989) para la determinación del periodo predominante y la respectiva amplificación sísmica.

En lugar de la transformada de Fourier, el método emplea la razón espectral H/V de los espectros de respuesta (HVRSR) de cada componente de registros sísmicos. La Tabla 3 muestra la clasificación de suelos propuesta por Idini et al. (2016) basada en el periodo predominante de HVRSR (T_P^*).

Tabla 3 – Clasificación de suelos en función del periodo predominante de vibración de HVRSR (Idini et al., 2016).

Clase	Periodo Predominante T_P^* (s)
S_I	No identificable: $HVSR \leq 2$
S_{II}	$T_P^* \leq 0,2$
S_{III}	$0,2 < T_P^* \leq 0,4$
S_{IV}	$0,4 < T_P^* \leq 0,8$
S_V	$0,8 < T_P^*$
S_{VI}	No identificable: Ancho de Banda o 2+ peaks

2.5 Población y Vivienda en la Región de Coquimbo

El análisis demográfico en el tiempo se realizó a partir de una revisión de los datos entregados por distintos censos de población, llevados a cabo por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE, 1940; INE, 1992; INE, 2002). Este análisis busca identificar la evolución y/o movilización de la población en la historia relativamente reciente, con el objeto de definir la estructura habitacional representativa de la Región.

La Figura 5 muestra una marcada tendencia al crecimiento tanto poblacional como en cantidad de viviendas, siendo este último incluso más pronunciado al alcanzar una tasa cercana al 60% de aumento en el periodo 2002 – 2012 en comparación a la población que crece en torno al 20% cada diez años. Este hecho toma relevancia en cuanto la infraestructura civil aumenta en la Región lo que hace necesaria la caracterización más exhaustiva de los suelos.

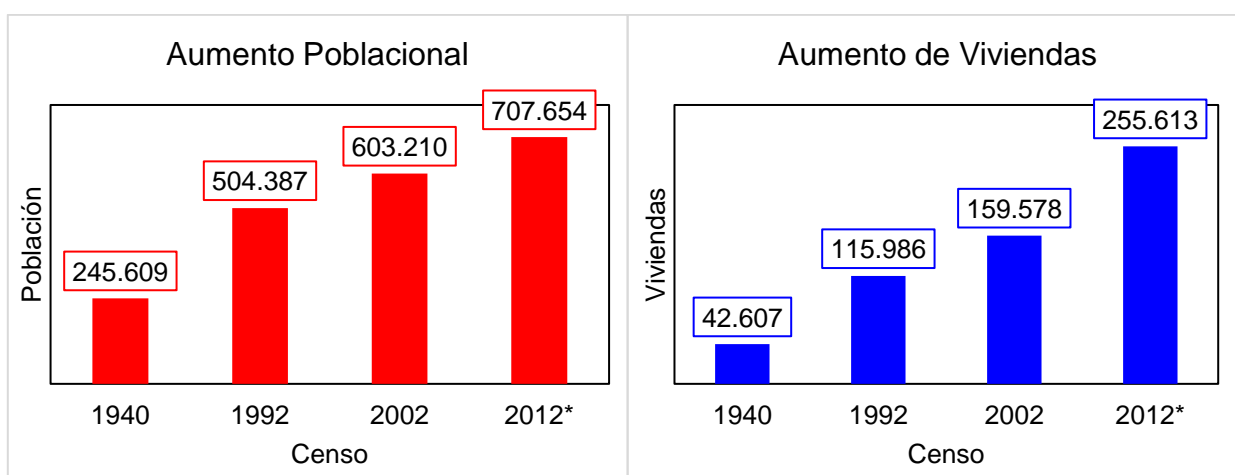


Figura 5 – Evolución de la población y viviendas de la Región de Coquimbo en el tiempo, de acuerdo a los Censos respectivos. (*) Datos del Censo 2012 son NO oficiales.

En la Figura 5 se incluyen los valores obtenidos en el Censo de 2012, pero debe advertirse que este instrumento fue catalogado como no-oficial por el Estado de Chile, puesto que se encontraron problemas en la metodología que derivaron en una omisión del 10,3% de la población encuestada en la Región, de acuerdo a la estimación realizada por el INE (2014). La situación se repite en las Figuras 6 a 9. De todas formas, en cuanto al número y materialidad de las viviendas, es posible considerar el Censo 2012 como una fuente fidedigna de datos, dado que la omisión se registra a nivel del segmento de población y la metodología obligó igualmente a los censistas a registrar las vivienda que visitaban aun cuando no se accedió a ellas para completar la encuesta.

2.5.1 Distribución de Población

El análisis desarrollado permite identificar la fluctuación demográfica a nivel comunal en la Región de Coquimbo entre el Censo de 1940 y el de 2012. De acuerdo a lo que se puede observar en las Figura 6 y Figura 7, la población de la Región de Coquimbo tiende a concentrarse hacia las ciudades de Coquimbo y La Serena, dejando en tercer lugar a Ovalle. Además, se puede notar que existen algunas comunas que manifiestan reducciones sostenidas de población, pero que han logrado estabilizarse en los últimos 10 años, lo que indica una movilidad fuera de los valles de la depresión intermedia de la Región hacia la costa. Esta situación implica que en general los centros urbanos de la mayoría de las comunas sean pequeños y que el área rural sea extensa y con una baja densidad poblacional.

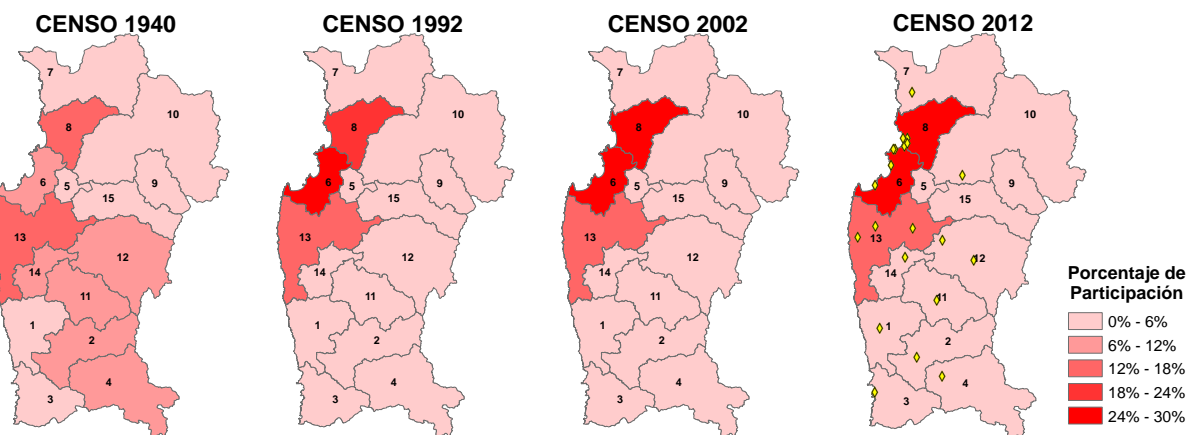


Figura 6 – Distribución espacial de la población en la Región de Coquimbo, de acuerdo a información del INE. La escala de colores contiene el aporte porcentual de cada comuna al total regional y es relativa a cada censo. Los puntos amarillos corresponden a las localidades estudiadas.

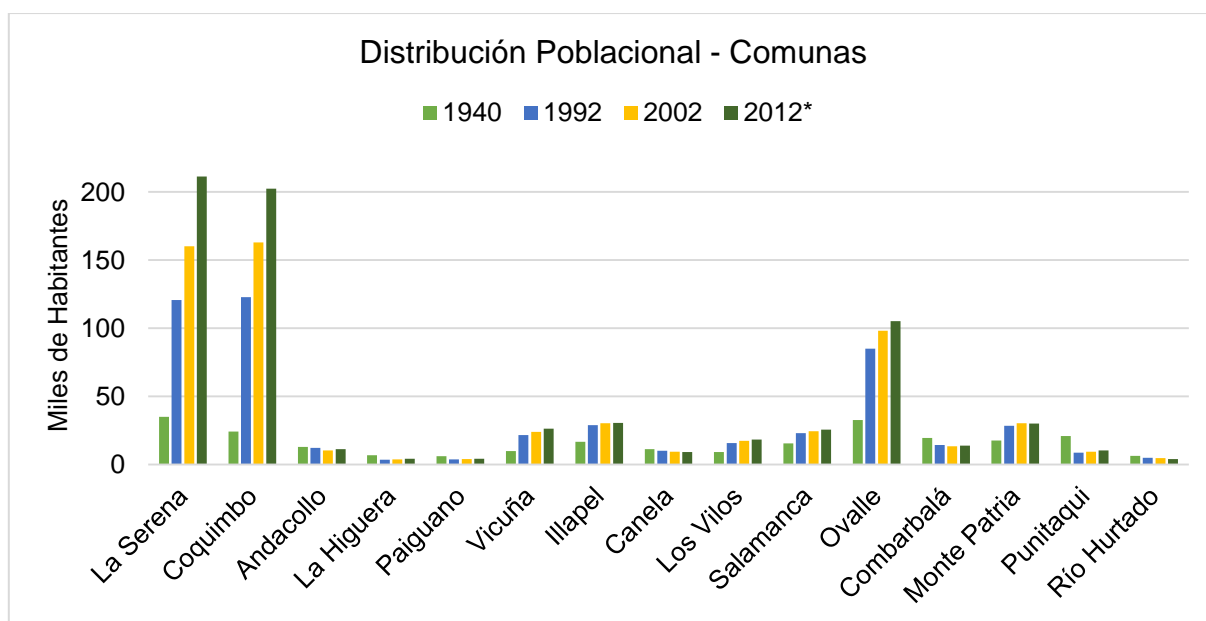


Figura 7 – Distribución comunal de población en el tiempo, de acuerdo a datos de censos de población y vivienda desde 1940 hasta 2012.

2.5.2 Distribución de Viviendas

Igualmente, a partir de la información obtenida en los Censos de población de los años 1940, 1992, 2002 y 2012, es posible generar las Figuras 8 y 9 con la cantidad y distribución del número de viviendas en la Región de Coquimbo.

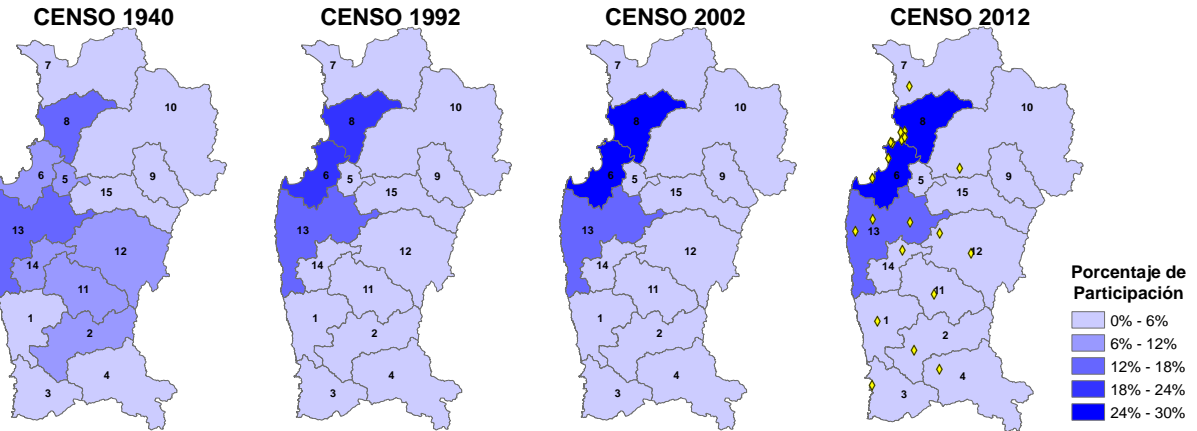


Figura 8 – Distribución espacial de las viviendas en la Región de Coquimbo, de acuerdo a información del INE. La escala de colores contiene el aporte porcentual de cada comuna al total regional y es relativa a cada censo. Los puntos amarillos corresponden a las localidades estudiadas.

Se aprecia que la tendencia de la población es consistente con la distribución de viviendas y que, a diferencia de lo que ocurre con los habitantes, en todas las comunas se evidencian aumentos en la cantidad de viviendas desde 1940 hasta 2012. El hecho de que La Serena, Coquimbo y Ovalle conjuntamente concentran el 68% de las viviendas podría eventualmente provocar alteraciones en los resultados de un análisis estadístico de los daños como el que se propone en esta investigación.

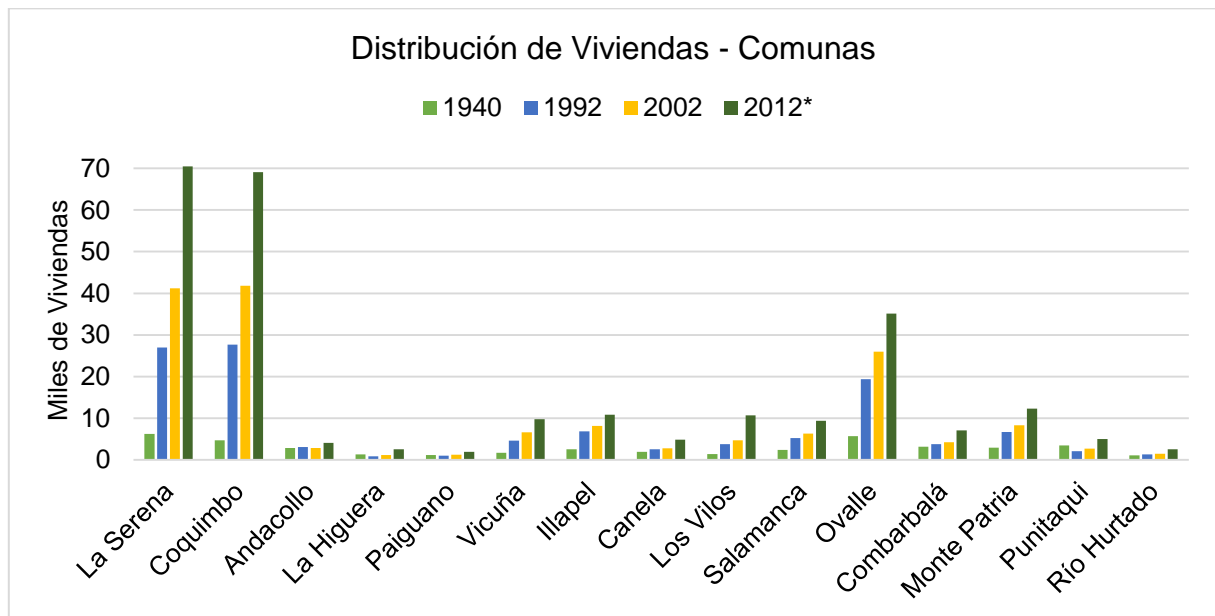


Figura 9 – Distribución comunal de viviendas en el tiempo, de acuerdo a datos de censos de población y vivienda desde 1940 hasta 2012.

2.6 Intensidades Sísmicas en Escala MSK

La escala de Medvedev-Sponheuer-Karnik (MSK) de intensidades macrosísmicas (Medvedev et al., 1964) puede ser aplicada al caso chileno a partir del nivel de daños presentados en las estructuras después de un terremoto, gracias a la metodología desarrollada por Astroza y Monge (1989). Esta adaptación al caso chileno incluye varios aspectos modificados de la escala original tales como la definición de niveles de daños y los tipos de edificios considerados, de acuerdo a la realidad de las construcciones del país.

El objetivo de esta metodología fue caracterizar los daños evidenciados durante el terremoto de 1985 en el país, pero ha sido aplicada en otras instancias como los terremotos de Punitaqui 1997 (Díaz, 2001; Piñones, 2002), Tocopilla 2007 (Astroza et al., 2008) y Maule 2010 (Astroza et al., 2012). El primero de ellos es de especial interés en cuanto el trabajo realizado contempla a la Región de Coquimbo, lo que permite una comparación de los resultados.

Para lograr la estimación de intensidades en cada localidad se cuenta, en primer lugar, con una escala de clasificación de daños para estructuras como se muestra en la Tabla 4, que dice relación con los tipos y niveles de falla esperados en viviendas construidas con materiales indicados en la Tabla 5. Además, en la Tabla 4 se definen 5 niveles de daños utilizados por el MINVU en su evaluación del estado de las viviendas post catástrofes, que corresponden a descripciones generales que no discriminan materialidad y que serán usados posteriormente en este estudio.

Tabla 4 – Definición de Nivel de Daños en viviendas.

MSK adaptada por Astroza y Monge (1989)		Definiciones MINVU (2015)	
Nivel	Descripción	Nivel	Descripción
N0	Sin daños.	D0	Sin daños.
N1	Daños menores en estucos: grietas finas o caídas de trozos pequeños de estuco.	D1	Daño leve: daños no estructurales en terminaciones.
N2	Grietas horizontales en antetechos, tímpanos y chimeneas. Grietas verticales en encuentros de muros, sin que aparezca separación. Grietas finas en muros bajo el nivel del cielo.	D2	Daño moderado: daños mayores que leves, recuperables y que no impiden la habitabilidad de la vivienda.
N3	Caídas de antetechos, tímpanos o partes de chimeneas. Grietas verticales en encuentros de muros con separación indicando desaplomo. Grietas diagonales en muros bajo el nivel cielo.	D3	Daño mayor reparable: daños estructurales reparables, que ponen en riesgo la seguridad de los habitantes.
N4	Caída de un muro o parte de un muro bajo el nivel del cielo.	D4	Daño no reparable: daños irre recuperables, que implican colapso (actual o inminente).
N5	Caída de más de un muro.		

Tabla 5 – Adaptación chilena de los tipos de edificio según escala MSK.

Tipo Edificio	Descripción
A	Edificios de adobe Edificios de mampostería de piedra unida con barro
B	Edificios de albañilería simple Edificios de mampostería de piedra unida con mortero de cemento
C	Edificios de albañilería reforzada con pilares y cadenas de hormigón armado

Algunas de las consideraciones de la adaptación chilena son el uso mayoritario de viviendas de un piso, descartando en general las de dos o más pisos por no ser frecuentes en Chile en la época del trabajo, y la exclusión de edificios con tabiquería de madera rellena, que podrían ser considerados eventualmente como edificios de tipo A o B (Astroza y Monge, 1989).

El Censo de 1992 (INE, 1992) indica que el material de construcción principal en la IV Región es el adobe. Este hecho es usado por Díaz (2001) para aplicar la metodología Astroza y Monge (1989) solo a viviendas de este material luego del terremoto de Punitaqui 1997, relacionando intensidad y daños de acuerdo a la Tabla 6.

Tabla 6 – Relación entre el grado de intensidad MSK con distribución estadística de daños para edificios Tipo A (adobe) y su homologación en escala de 5 niveles de daños.

Grado MSK Edificios Tipo A	Criterio Astroza y Monge (1989)		Homologación de Díaz (2001)	
	%	% Acum.	%	% Acum.
V	95% N0	95% N0	95% D0	95% D0
	5% N1	100% N1	2,5% D1	97,5% D1
			2,5% D2	100% D2
VI	45% N0	45% N0	45% D0	45% D0
	50% N1	95% N1	25% D1	70% D1
	5% N2	100% N2	27,5% D2	97,5% D2
		2,5% D3	100% D3	
VII	10% N1	10% N1	5% D1	5% D1
	35% N2	45% N2	22,5% D2	27,5% D2
	50% N3	95% N3	42,5% D3	70% D3
	5% N4	100% N4	30% D4	100% D4
VIII	10% N2	10% N2	5% D2	5% D2
	35% N3	45% N3	22,5% D3	27,5% D3
	50% N4	95% N4	72,5% D4	100% D4
	5% N5	100% N5		
IX	15% N3	15% N3	7,5% D3	7,5% D3
	35% N4	50% N4	92,5% D4	100% D4
	50% N5	100% N5		
X	25% N4	25% N4	100% D4	100% D4
	75% N5	100% N5		
XI	100% N5	100% N5	100% D4	100% D4

Díaz (2001), además, posee datos de daños provocados por el terremoto de Punitaqui 1997 en ambas definiciones, tanto MSK como gubernamentales (Tabla 4), con lo cual genera una homologación que permite determinar intensidades MSK directamente de datos del Gobierno sin necesidad de contar con los otros (Tabla 6). Este trabajo se realiza solo para viviendas de adobe y parte de él será aplicado en la Sección 4.2.2 para estimar las intensidades MSK del terremoto de Illapel 2015.

Por otra parte, con los datos de la Tabla 6 se puede realizar una representación gráfica de porcentajes acumulados de daños de acuerdo a cada grado de intensidad MSK, lo que se conoce como **curvas patrón** (Figura 10). Esto se puede realizar tanto para la definición original de Astroza y Monge (1989) como para la homologación desarrollada por Díaz (2001).

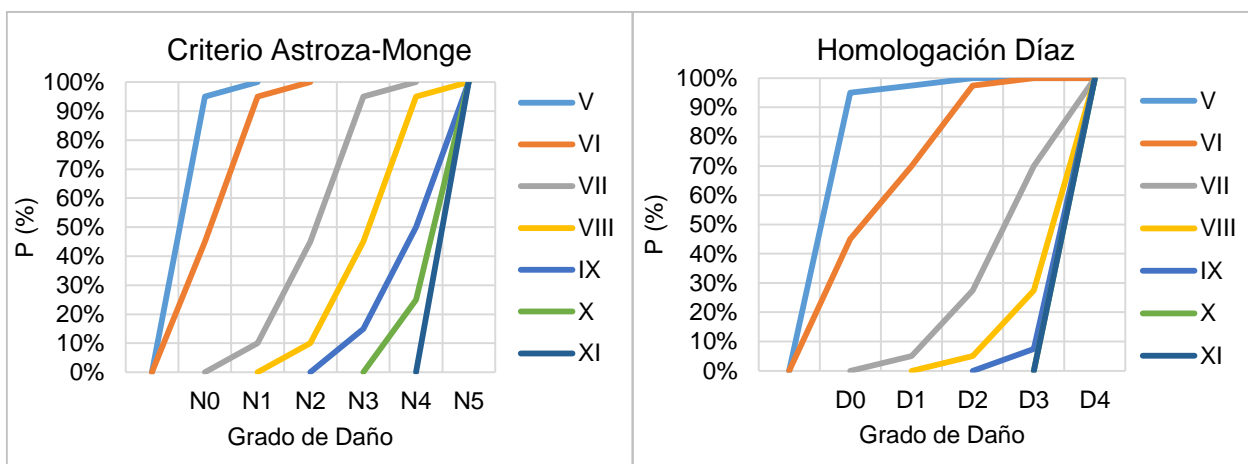


Figura 10 – Curvas Patrón en escala MSK para daños en construcciones de adobe. Gráfico izquierdo contiene curvas originales de Astroza y Monge (1989), gráfico derecho muestra curvas con homologación de grados de daños propuestos por Díaz (2001).

Finalmente, a partir de la información obtenida por medio de encuestas o catastros de daños en la zona de estudio después de un evento sísmico, es posible trazar la curva de daños real y compararla con las curvas patrón. De esta manera, se obtiene el grado de intensidad del evento mediante el nivel de daños observados (Astroza y Monge, 1989).

La metodología para estimar la intensidad con datos medidos es descrita por Menéndez (1991) y consiste en una ponderación por la razón de áreas de los polígonos formados por las curvas patrón y la curva real medida. En la Sección 4.2 se explica en detalle la aplicación de la metodología en el presente trabajo y el cálculo de las intensidades con los datos del terremoto de Illapel 2015.

En la actualidad, la escala de intensidades MSK sigue siendo utilizada, por ejemplo, por medio de la Escala Macrosísmica Europea (EMS 98), que es una modernización y ampliación de la MSK. En efecto, la escala fue aplicada exitosamente para evaluar los daños provocados por el Terremoto de Amatrice M_w 6.2 de 2016, donde permitió observar una influencia significativa de los efectos de sitio en algunas localidades. Sin embargo, presentó ciertos problemas cuando se catastraron sitios afectados por terremotos anteriores y porque los distintos grados de daños evidenciados en materialidades diferentes indicaron valores de intensidades discordantes para un mismo lugar (Zanini et al., 2016).

En paralelo, se han desarrollado otros métodos para la estimación de daños pre y post terremotos que, en general, emplean herramientas probabilísticas. Un ejemplo de ellos es el método de espectros de capacidad y curvas de fragilidad que se describe brevemente en el ANEXO D. En este trabajo no es posible aplicarla debido a la diversidad de edificaciones en la Región, además del escaso nivel de información que se cuenta de ellas.

CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN SÍSMICA DE SUELOS

En este Capítulo se describe la caracterización sísmica de suelos. En primer lugar, se emplea la técnica de las razones espectrales H/V con la finalidad de estimar el periodo predominante de vibración de los depósitos de suelo de las estaciones sismológicas. La herramienta se aplica mediante dos variantes, la primera responde a la generación de razones espectrales H/V a partir del procesamiento de registros de vibraciones ambientales, mientras que en la segunda, las curvas se calculan usando los registros sísmicos en las mismas estaciones (Lermo y Chávez-García, 1993). Esto podría permitir la comparación del comportamiento del suelo ante distintos grados de deformación y así evaluar su cambio de rigidez. En segundo lugar, se construyen espectros de respuesta en aceleración de los depósitos de suelo, en 3 componentes (NS, EW, Z). Finalmente, se complementa la información del periodo predominante con perfiles de velocidad de onda de corte V_s en profundidad, calculados a partir de métodos geofísicos.

3.1 Estaciones Sismológicas

El monitoreo constante de la actividad sísmica del país se realiza mediante dos redes sismológicas principales y una tercera con fines principalmente académicos e ingenieriles. La primera corresponde a la Red Sismológica Nacional (RSN) compuesta por estaciones desplegadas a lo largo del país que cuentan cada una con un sismógrafo de banda ancha, un acelerómetro y una antena de GNSS (*“Global Navigation Satellite System”*) o GPS (*“Global Position System”*), además de los sistemas de adquisición y transmisión de datos y las fuentes de alimentación de energía. Esta red fue instalada y es actualmente operada por el Centro Sismológico Nacional (CSN). La segunda es la Red Nacional de Acelerógrafos (RNA), compuesta por más de 297 acelerógrafos distribuidos en todo el país, cuyo fin principal es la medición de movimientos fuertes en campo cercano, además de contribuir a la caracterización de la respuesta de distintos tipos de suelos ante sollicitaciones sísmicas. Actualmente, se encuentra en fase de traspaso para mantención y operación por parte del CSN. Finalmente, la tercera red pertenece al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile y se la conoce como Red de Cobertura Nacional de Acelerógrafos (RENADIC), cuyos instrumentos principales son acelerógrafos.

El CSN además se encarga de publicar los datos registrados en las estaciones y mantener actualizada una base de datos disponible en la página web (<http://evtdb.csn.uchile.cl/>) con todos los sismos ocurridos desde 2012 de magnitud $M \geq 5.0$. Los registros de aceleraciones empleados en este estudio se obtuvieron desde esta página web.

En respuesta a la disponibilidad de registros de aceleraciones, se decide trabajar con 19 estaciones sismológicas pertenecientes a las redes RNA y RSN. Las estaciones fueron seleccionadas dado que se encuentran dentro del territorio de la Región de Coquimbo y cuentan con 2 o más registros de sismos que cumplen con los criterios que se definen más adelante (Sección 3.2).

Así, en la Tabla 7 se muestran las características principales de las 19 estaciones analizadas, donde se indica su ubicación, el tipo de sensor y la frecuencia de muestreo, además del código que las identificará en adelante.

Tabla 7 – Listado de estaciones sismológicas procesadas en el estudio.

Código	Ubicación	Comuna	Latitud [°]	Longitud [°]	Tipo Sensor	f [Hz]
C010	Las Compañías	La Serena	-29.877	-71.238	Acel.	200
C040*	Cuartel SIAT	La Serena	-29.942	-71.263	Acel.	200
C050	Punitaqui	Punitaqui	-30.833	-71.258	Acel.	200
C070	Illapel	Illapel	-31.634	-71.168	Acel.	200
C090	La Higuera	La Higuera	-29.511	-71.200	Acel.	200
C110	Monte Patria	Monte Patria	-30.696	-70.959	Acel.	200
C120	Canela Baja	Canela	-31.246	-71.458	Acel.	200
C130	Carretera 5 Norte	Limarí	-30.579	-71.495	Acel.	200
C160*	Colegio Caleta S.P.	La Serena	-29.879	-71.271	Acel.	200
C190	Las Tacas	Coquimbo	-30.093	-71.369	Acel.	200
C200	Hospital de Coquimbo	Coquimbo	-29.968	-71.337	Acel.	200
C220	UCN Sede Guayacán	Coquimbo	-29.965	-71.351	Acel.	200
C260	Tongoy	Coquimbo	-30.259	-71.490	Acel.	200
C330	Estadio La Portada	La Serena	-29.911	-71.251	Acel.	200
CO02	Obs. Cruz del Sur	Combarbalá	-31.204	-71.000	Sis. BA	100
CO03	Pedregal	Monte Patria	-30.839	-70.689	Sis. BA	100
CO05*	Obs. Cerro Tololo	La Serena	-29.919	-71.238	Sis. BA	100
CO06	Parque Fray Jorge	Ovalle	-30.674	-71.635	Sis. BA	100
GO04	Obs. Cerro Tololo	Vicuña	-30.173	-70.799	Sis. BA	100

NOTA: (*) Estaciones sin registros sísmicos para analizar a diciembre de 2016. **Acel.:** Acelerógrafo. **Sis.BA:** Sismógrafo Banda Ancha. **f:** frecuencia muestreo del sensor.

La Figura 11 muestra, sobre el mapa de la Región de Coquimbo, gran parte de las estaciones sismológicas pertenecientes a las redes RSN y RNA en cada comuna y provincia. La información muestra también los registros de aceleraciones obtenidos en 6 estaciones durante el terremoto de Illapel 2015, destacando las aceleraciones máximas alcanzadas.

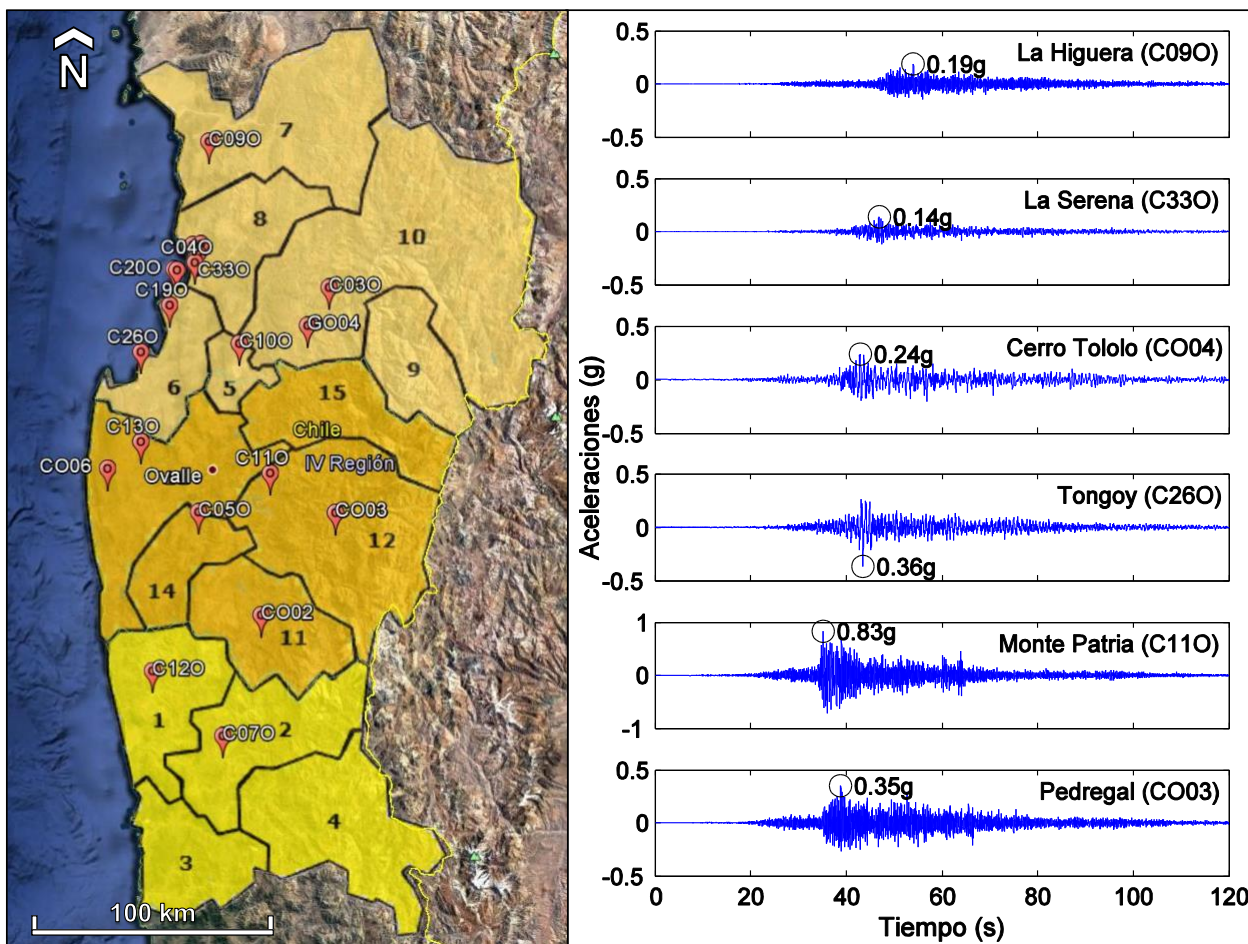


Figura 11 – Ubicación de las estaciones sismológicas de la IV Región. En la derecha, se muestran registros de aceleraciones medidas durante el terremoto de Illapel 2015 en algunas de las estaciones.

3.2 Eventos Sísmicos Considerados

En este estudio fueron considerados todos aquellos sismos de magnitud $M_w \geq 5.0$, que además ocurrieran en una ventana temporal entre enero de 2013 y marzo de 2016, y físicamente localizados entre los paralelos 29°S y 33°S , de acuerdo a la base de datos del CSN (Figura 12).

La base de datos con la información completa de los 87 eventos, incluyendo fecha, hora, ubicación, profundidad, magnitud y la cantidad de estaciones que registraron cada uno de ellos se encuentra en el ANEXO A.

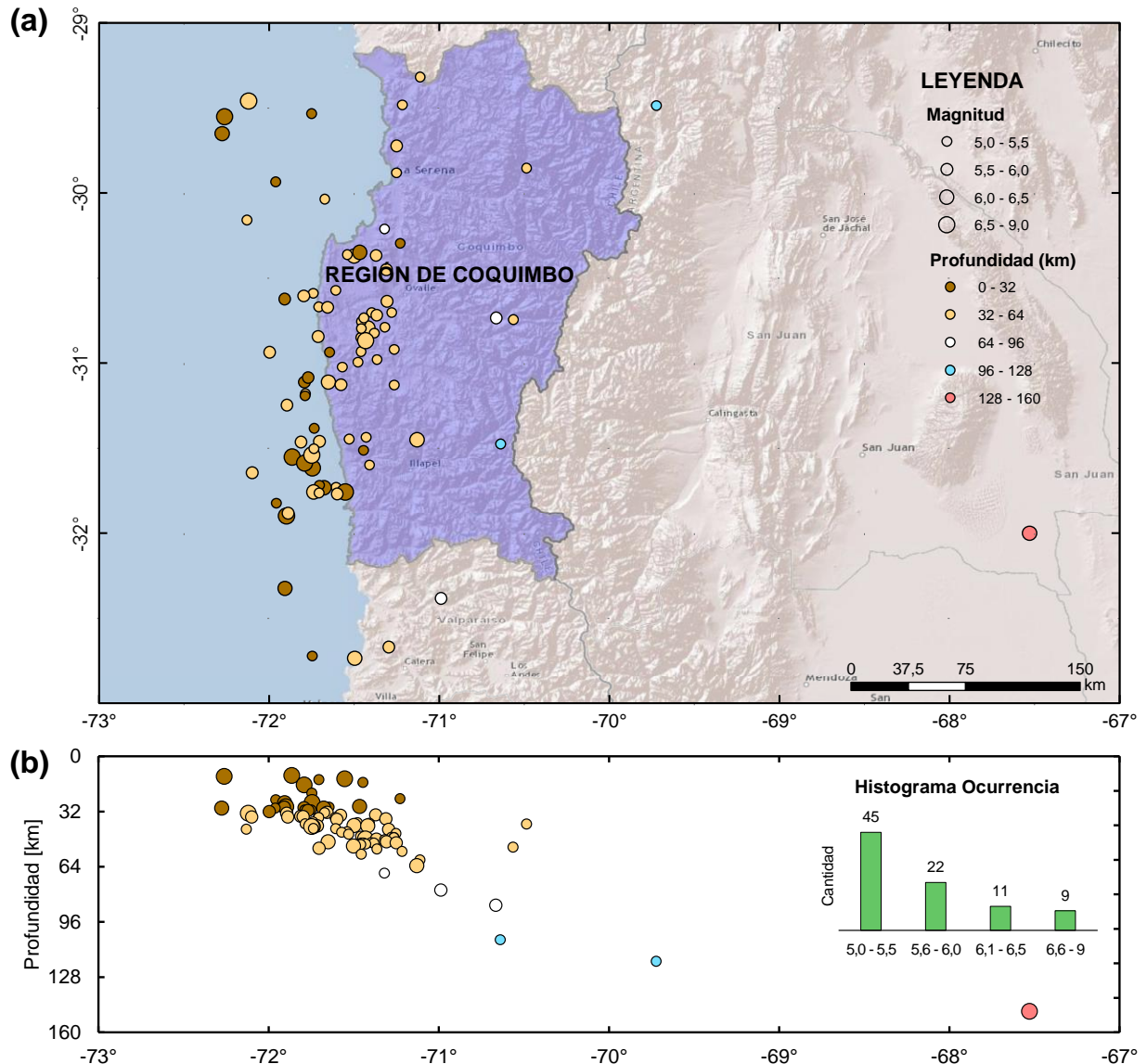


Figura 12 – Eventos sísmicos considerados en este estudio, catalogados en escala de colores y tamaño de acuerdo a su profundidad y magnitud, respectivamente. En (a) se localizan los epicentros de cada uno y en (b) su profundidad en un perfil transversal junto con un histograma de ocurrencia por rango de magnitud (datos consultados en noviembre de 2016 en <http://evtdb.csn.uchile.cl/>).

3.3 Campañas de Medición de Vibraciones Ambientales

En este trabajo se consideró información de campañas de mediciones de vibraciones ambientales realizadas en terreno por el Centro Sismológico Nacional (CSN) y los Departamentos de Ingeniería Civil (DIC) y Geofísica (DGF) de la Universidad de Chile (Tabla 8). Esto con la finalidad de aplicar el método de las razones espectrales H/V, facilitando la caracterización sísmica de sitios por medio de la determinación del periodo predominante de vibración (Nakamura, 1989), además de obtener perfiles de Vs a partir de curvas de dispersión de ondas Rayleigh (Sáez, 2016).

Tabla 8 – Campañas de mediciones de vibraciones ambientales.

Campaña	Fecha
CSN 1	Septiembre 2015
DIC 1	Septiembre 2015
CSN 2	Diciembre 2015
CSN – DIC	Enero 2016
CSN 3	Junio 2016
CSN 4	Noviembre 2016

La Tabla 8 muestra las fechas en las que las campañas de mediciones fueron realizadas en la Región de Coquimbo. Además, en la Figura 13 se muestran las localidades cubiertas con el trabajo en terreno, cuyo principal objetivo era medir en las estaciones sismológicas de la Región.

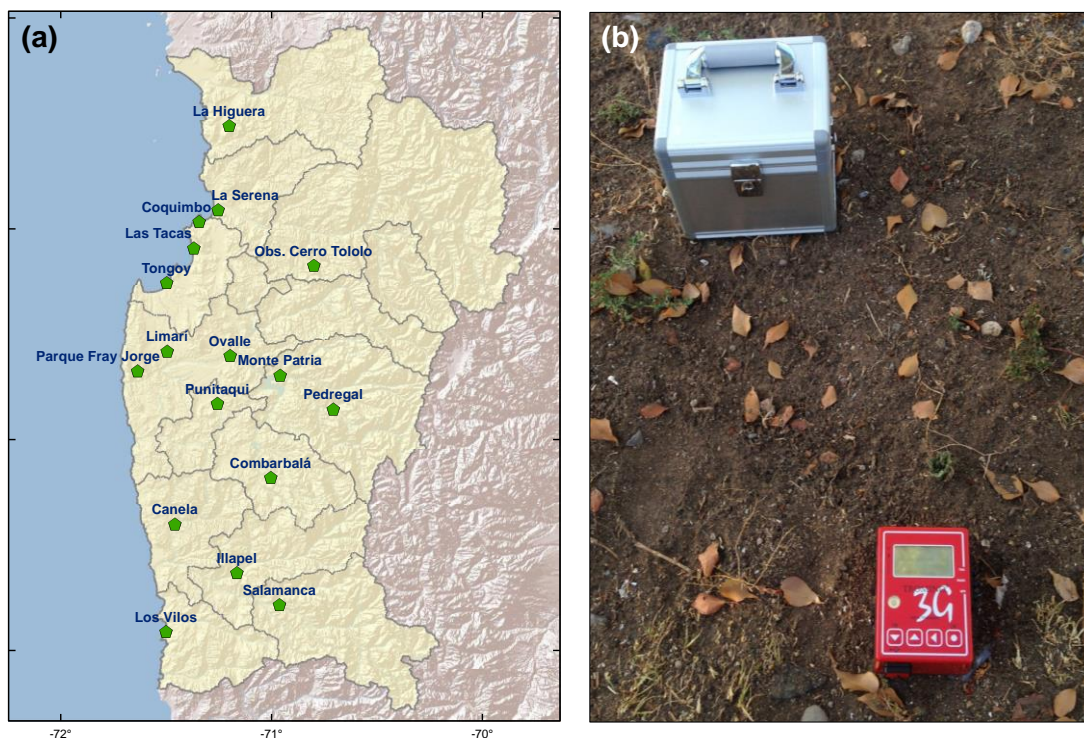


Figura 13 – (a) Localidades en las que se realizaron mediciones de vibraciones ambientales. (b) Sensor Tromino® empleado para realizar las mediciones.

Las mediciones fueron realizadas en modalidades activa y pasiva, pero solo se emplearon las pasivas para realizar los análisis del presente trabajo. La metodología aplicada en terreno está basada en arreglos geométricos de varios sensores Tromino® (ver Figura 13b), sismógrafo portátil de 3 componentes y frecuencia fundamental de 4,5 Hz. De acuerdo al espacio disponible y a las condiciones del terreno, el arreglo estaba compuesto por 4 equipos, uno en cada vértice de un triángulo equilátero más un cuarto en el centro, o uno en cada vértice de un cuadrado. También se utilizó una combinación de ambos arreglos cuando se dispuso de 8 o más equipos.

Tabla 9 – Registros de vibraciones ambientales por estación.

Código Estación	Ubicación	Campaña	Cantidad de Sensores	Duración de Mediciones [min]	Registros Sísmicos Disponibles
C010	Las Compañías	CSN3	8	60	Sí
C040	Cuartel SIAT	CSN3	8	60	No
C050	Punitaqui	CSN-DIC	8	30	Sí
C070	Illapel	CSN1	12	20	Sí
C090	La Higuera	CSN3	8	60	Sí
C110	Monte Patria	CSN-DIC	4	30	Sí
C120	Canela Baja	CSN1	8	20	Sí
C130	Limarí	CSN3	8	60	Sí
C160	Colegio Caleta San Pedro	CSN3	8	60	No
C190	Las Tacas	CSN3	8	40	Sí
C200	Hospital Coquimbo	CSN3	4	40	Sí
C220	UCN Guayacán	CSN2	1	20	Sí
C260	Tongoy	CSN3	8	60	Sí
C330	Estadio La Portada	CSN3	8	60	Sí
CO02	Obs. Cruz del Sur	Estación	-	80	Sí
CO03	Pedregal	Estación	-	300	Sí
CO05	Cerro Tololo (La Serena)	CSN4	4	20	No
CO06	Parque Fray Jorge	Estación	-	380	Sí
GO04	Obs. Cerro Tololo	CSN3	8	40	Sí
-	Combarbalá	CSN-DIC	8	30	No
-	Ovalle	CSN-DIC	8	20-30	No
-	Salamanca	CSN-DIC	8	30	No
-	Los Vilos	CSN2	8	20	No

La Tabla 9 muestra una descripción de la cantidad de registros de sensores Tromino® y su respectiva duración por estación (y/o ubicación), además indica la campaña de origen de los datos y la disponibilidad de registros sísmicos para calcular razones espectrales H/V.

Cada campaña de la Tabla 8 aportó la cantidad de registros de la duración que se indica en la Tabla 9 siendo estos los que permitieron estimar curvas H/V, exceptuando las estaciones con sensores banda ancha, CO02, CO03 y CO06, cuyas curvas se obtuvieron de extractos del registro diario de actividad en cada una, razón por la cual la duración es considerablemente mayor al resto de las estaciones. Igualmente, en la Tabla 9 se observan los 3 casos de análisis en los que se dividen los datos disponibles: (1) estaciones sismológicas que cuentan con registros sísmicos y con mediciones pasivas de vibración ambiental, (2) estaciones sismológicas que NO cuentan con registros sísmicos, pero sí fueron medidas pasivamente y (3) localidades que no cuentan con estaciones sismológicas activas en el periodo estudiado, pero que son relevantes demográficamente y que fueron levantadas en las campañas de medición.

3.4 Determinación Curvas HVSR

Cálculo de Curvas a partir de Eventos Sísmicos

Para cada evento sísmico del que se tenga registro en cada estación, se realiza el siguiente procedimiento para obtener la curva de razón espectral H/V.

1. Se identifica el registro de aceleración más largo de los disponibles para luego completar con ceros los registros más cortos. De esta forma se obtienen registros con igual cantidad de datos.
2. Se calcula la transformada de Fourier de cada componente de los registros.
3. Se suavizan los espectros, aplicando una media móvil en torno a una vecindad de 0,25 Hz, eliminando así comportamientos excesivamente anómalos en los espectros.
4. Se genera un único espectro de la componente horizontal como la media aritmética de los dos registros horizontales.
5. Se divide el espectro de la componente horizontal en la vertical.
6. Se grafica la razón espectral junto la del resto de los sismos.

En los gráficos de la Figura 14 pueden observarse los eventos sísmicos en gris mientras que las estaciones que poseen registro del terremoto de Illapel 2015 poseen una curva roja calculada con tales aceleraciones.

El procedimiento presentado es idéntico al empleado en el trabajo de Pinto (2016), quien lo aplicó a las estaciones de la Región de Tarapacá.

Cálculo de Curvas a partir de Vibraciones Ambientales

Los datos de las mediciones en terreno, descritas en la Sección 3.3, fueron procesados con el software Geopsy® en su módulo H/V, dentro del cual fueron seleccionadas ventanas de 30,0 s de largo que satisfacían el criterio para el análisis espectral. Luego, las curvas fueron suavizadas por el filtro propuesto por Konno y Ohmachi (1998) con constante de suavizado $b = 40$. Finalmente, se calculó el promedio geométrico de las componentes horizontales y se dividió por la componente vertical.

Una vez realizado lo anterior, se graficaron las curvas obtenidas en azul junto con las de eventos sísmicos para cada estación (Figuras 14 a 16).

Cálculo de Curvas Promedio y Desviación Estándar

Se calculó el promedio y la desviación estándar exclusivamente para los eventos sísmicos procesados previamente, lo que incluye el terremoto principal de Illapel 2015. El promedio corresponde a la media aritmética simple de la amplitud espectral mientras que la desviación estándar es la raíz cuadrada de la varianza de la misma (la varianza es la media de los cuadrados de las diferencias entre cada valor y el promedio de la muestra). Esta última solo se calculó en estaciones con 4 o más registros sísmicos.

Así, el promedio se graficó en una curva negra continua, mientras que la región de variación esperada respecto a la media aritmética queda delimitada por las curvas negras discontinuas, calculadas como el promedio más y menos el 50% de la desviación estándar en los casos superior e inferior, respectivamente (Figura 14).

3.4.1 Resultados de HVSRs

En las Figura 14 a 16 se muestran los resultados de la aplicación de la metodología HVSR a los 3 casos disponibles: estaciones sismológicas de la Región con registros sísmicos y vibraciones ambientales (Figura 14), estaciones sin registros sísmicos (Figura 15) y localidades sin estación sismológica activa (Figura 16).

En las Figura 15 y Figura 16 se incluyeron las desviaciones estándar de las mediciones de vibraciones ambientales (curvas discontinuas) al promediar los resultados de varios equipos. Para el último caso, se realizaron mediciones de vibraciones ambientales en más de un sitio en cada localidad, y los resultados mostrados en la Figura 16 corresponden a los promedios de todas las mediciones de cada uno. En el caso de Ovalle, las mediciones se hicieron en torno a la estación sismológica inactiva en el centro y en el estadio ubicado sobre una de las terrazas norte de la ciudad, mientras que en Combarbalá se ubicaron en la Plaza de Armas y en las afueras (sur), donde se encuentra una estación sismológica inactiva. Asimismo, en Salamanca los sitios estudiados corresponden a dos canchas de fútbol ubicadas en los sectores NE y SW, respectivamente, mientras que en Los Vilos se midió solo un sitio, pero a dos escalas distintas, en el sector norte de la ciudad donde se encuentra la estación inactiva del lugar.

Para ilustrar las descripciones anteriores, se incluyen imágenes satelitales mostrando la ubicación de cada sitio medido, junto con un perfil transversal que caracteriza la topografía del lugar (Figura 17 y Figura 18).

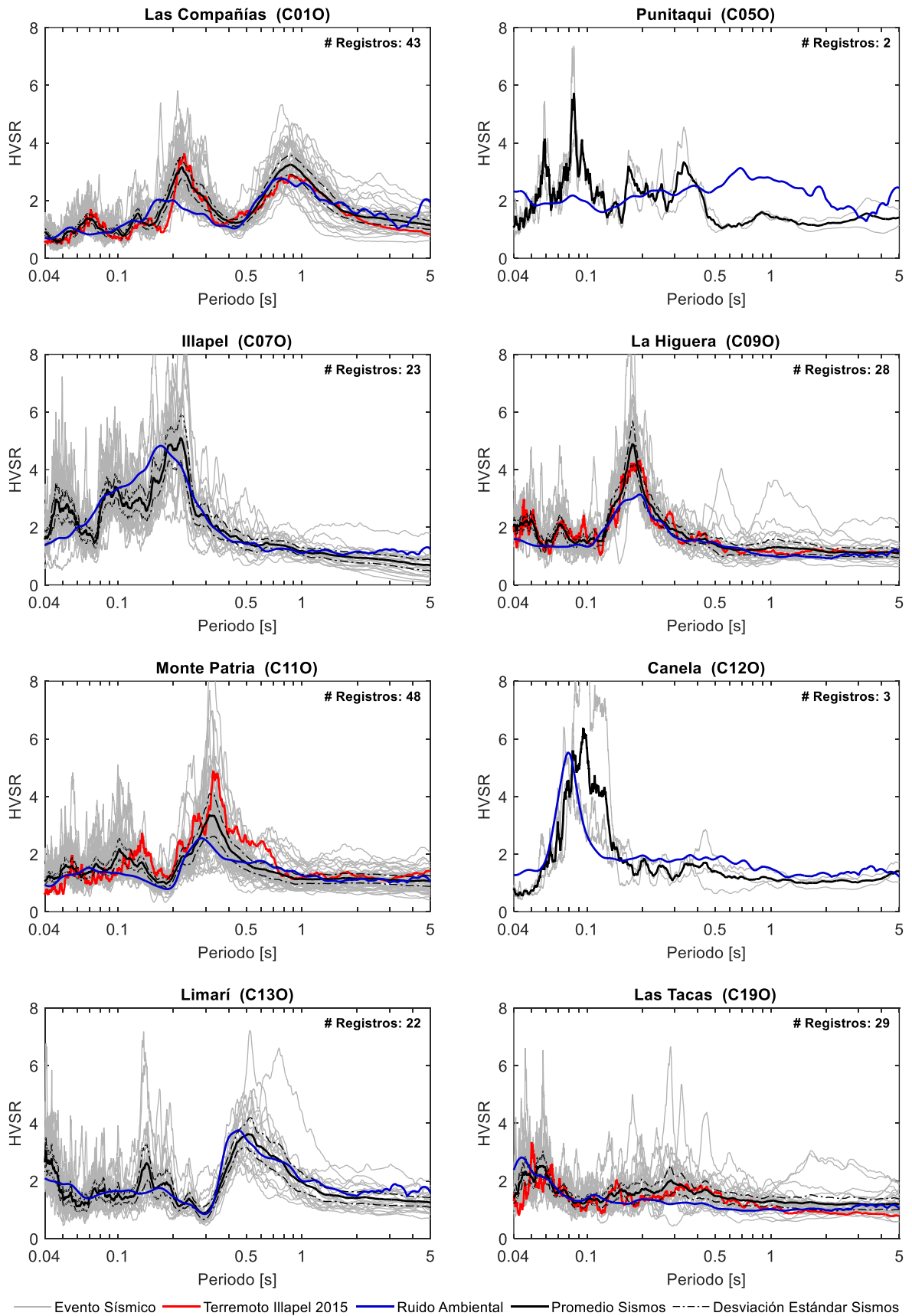


Figura 14 – Resultados HVSR para estaciones con registros sísmicos y de vibraciones ambientales.

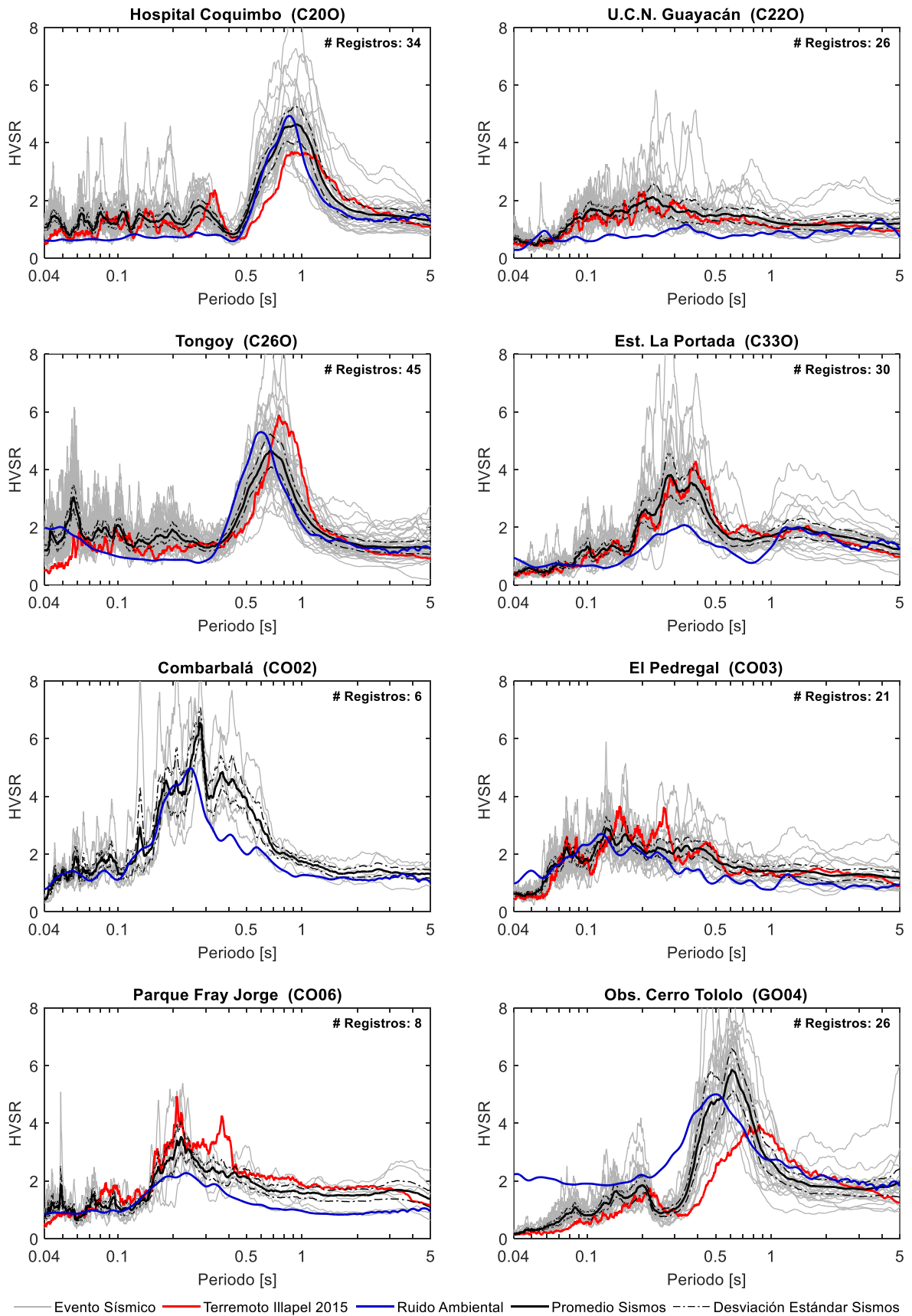


Figura 14 (continuación) – Resultados HVSR para estaciones con registros sísmicos y de vibraciones ambientales.

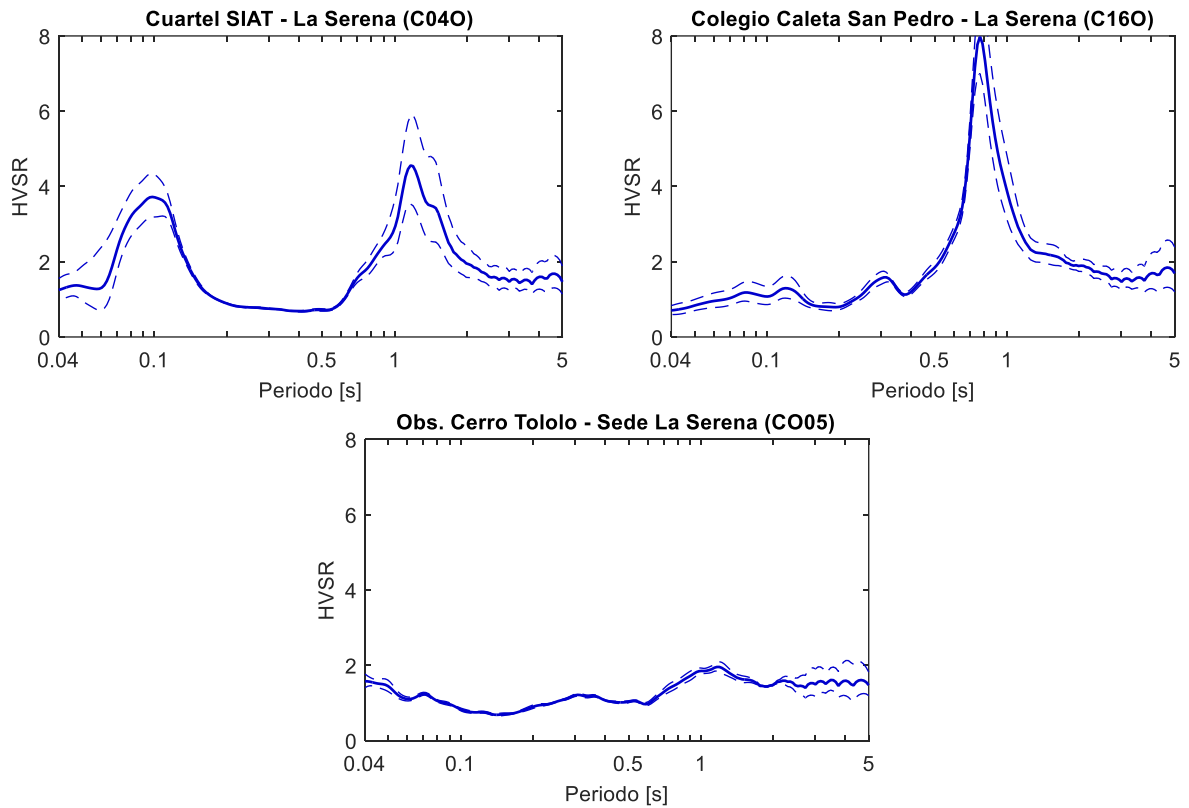


Figura 15 – Resultados HVSR en estaciones sin registros sísmicos.

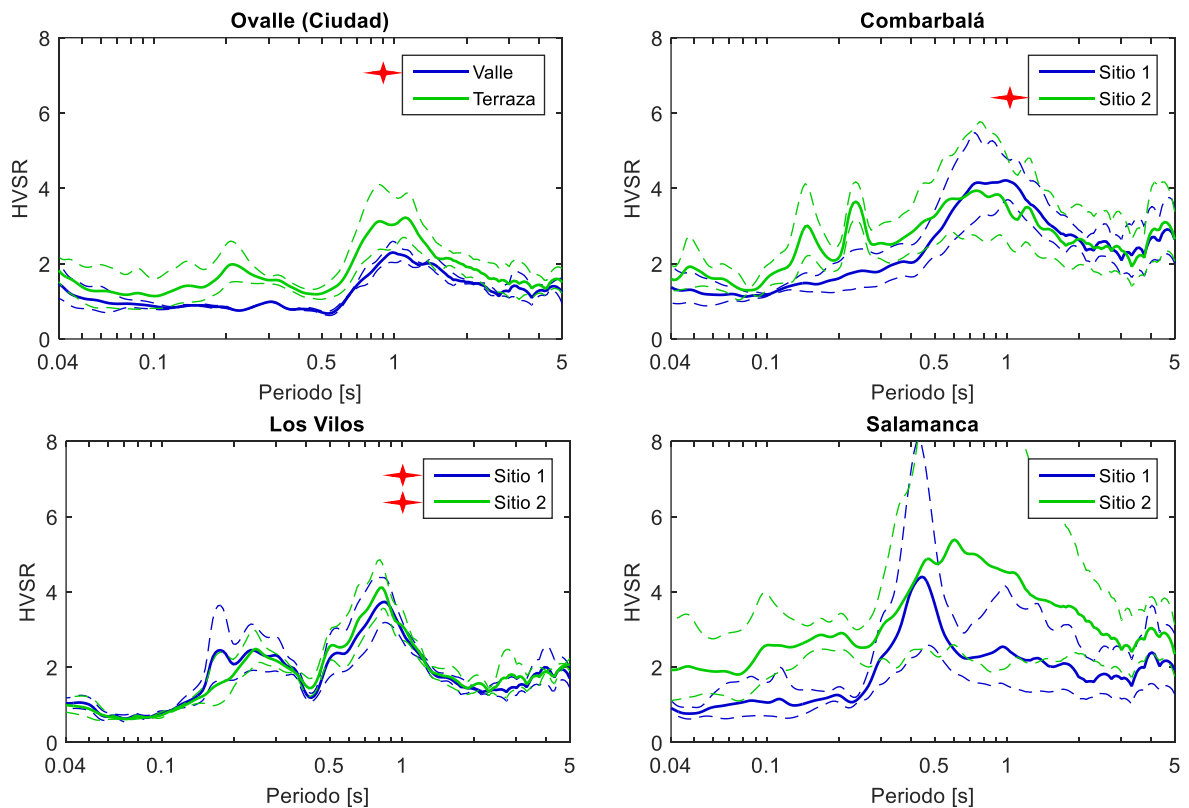


Figura 16 – Resultados HVSR de mediciones de vibraciones ambientales en ciudades sin estación sísmológica activa, en distintos sitios. La marca roja indica el sitio en el que se encuentra la estación sísmológica.

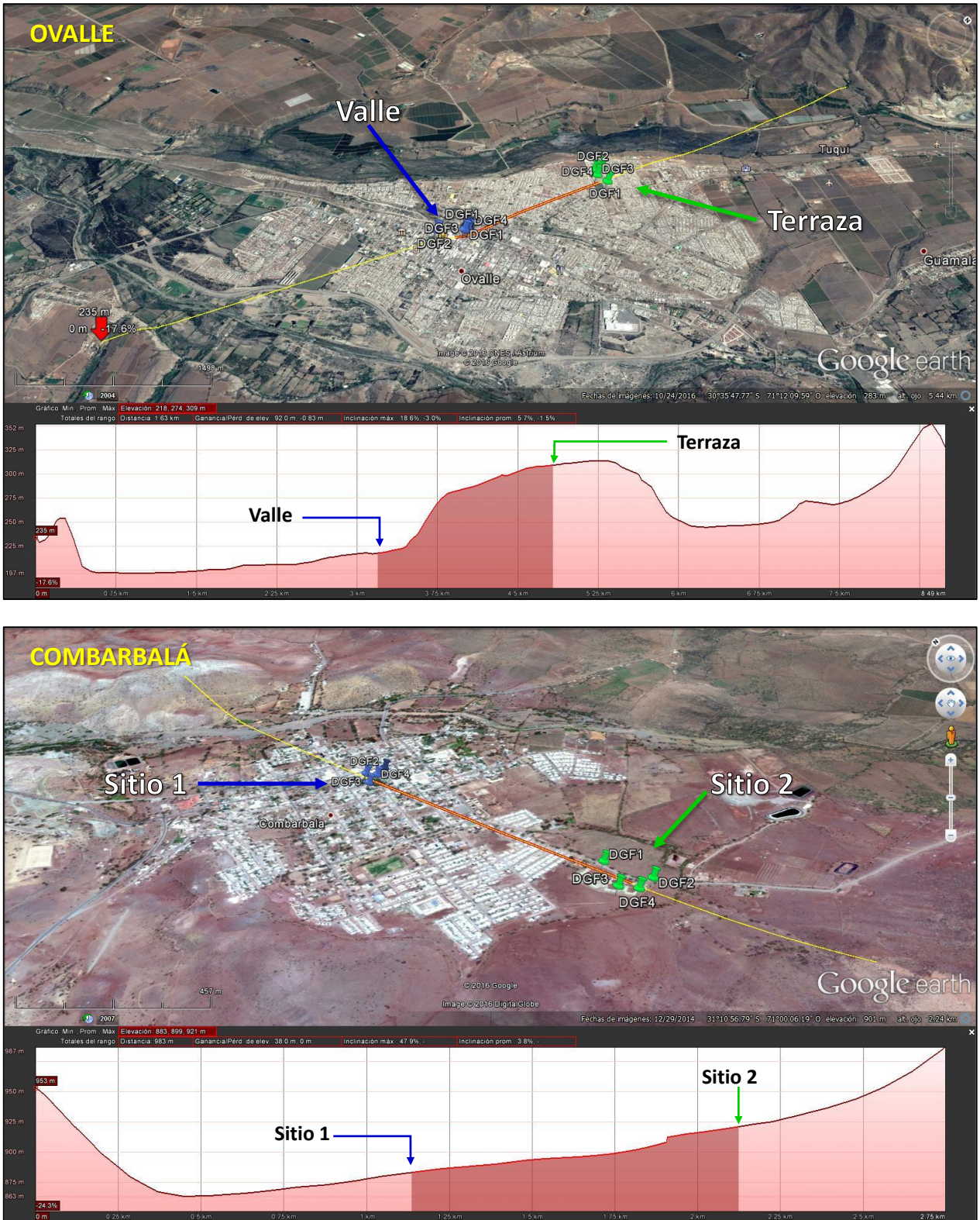


Figura 17 – Ubicación de los sitios de medición de vibraciones ambientales en las localidades de Ovalle y Combarbalá, junto con los perfiles transversales asociados a la traza amarilla de la imagen satelital.

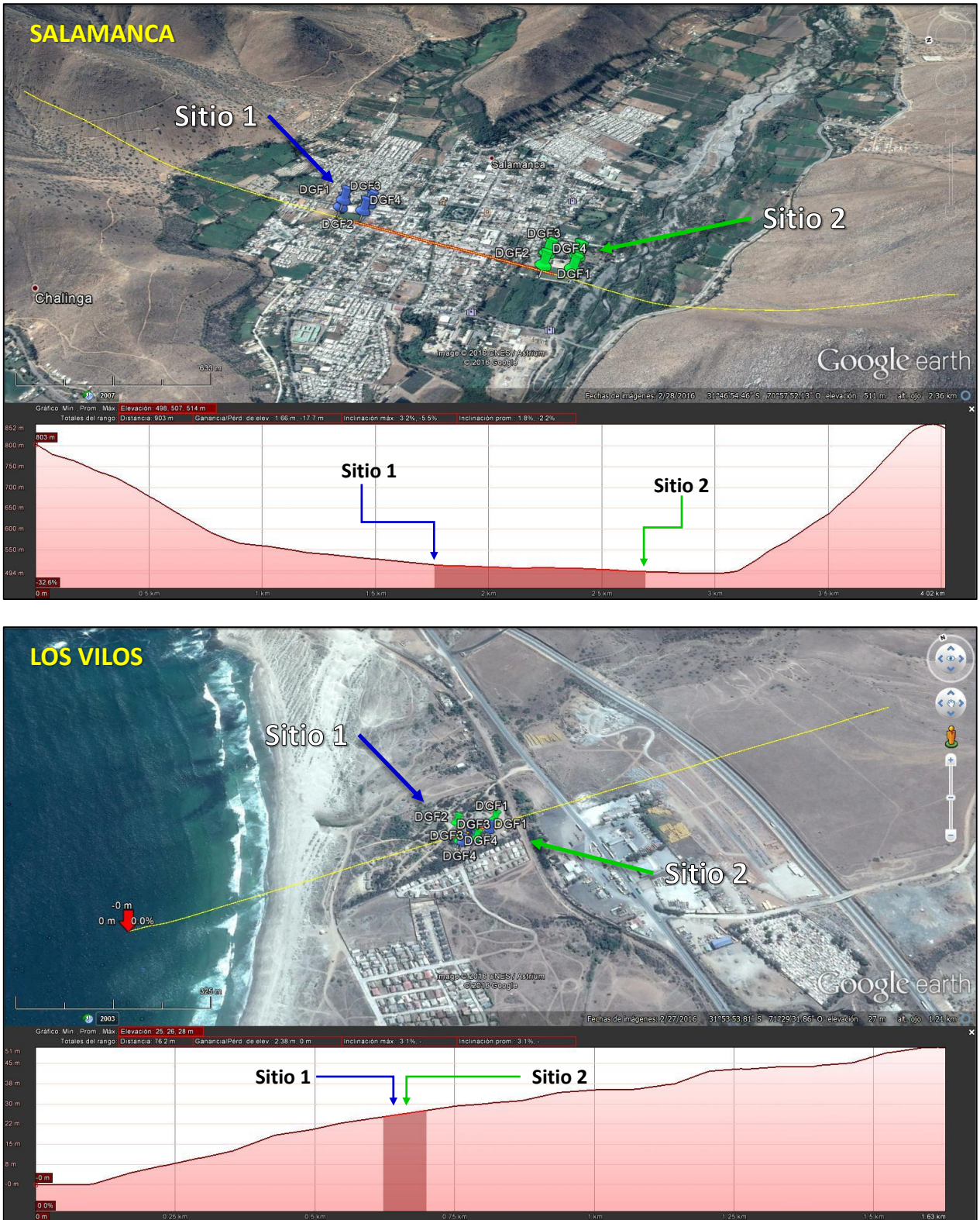


Figura 18 - Ubicación de los sitios de medición de vibraciones ambientales en las localidades de Salamanca y Los Vilos, junto con los perfiles transversales asociados a la traza amarilla de la imagen satelital.

3.4.2 Determinación Periodo Predominante H/V y Rigidez

La Tabla 10 muestra los periodos predominantes de vibración de cada estación, basándose en la elección del periodo asociado a la mayor amplitud de HVSR en cada gráfico. Este procedimiento se realiza para las 3 curvas principales, esto es, promedio de eventos sísmicos (T_{PS}), terremoto Illapel 2015 (T_{PT}) y vibraciones ambientales (T_P). Al valor del periodo en el que se produce la mayor amplitud de esta última curva se le conoce como periodo predominante del suelo y es el que define la rigidez del depósito para pequeñas deformaciones.

Para evaluar la rigidez del suelo se recurre a lo establecido por Idini et al. (2016), quienes determinan que un suelo se clasifica como rígido si el valor del periodo predominante de HVRSR (T_P^*) es menor o igual a 0,4 s o si la curva es plana (con $HVRSR \leq 2$). Luego, se debe establecer una relación entre T_P y T_P^* , asociados a HVSR y HVRSR, respectivamente, para lograr la clasificación deseada en función del periodo predominante de vibraciones ambientales. Para ello, se utilizan valores de T_P^* estimados por González (2017) y se los compara con los obtenidos en este trabajo en la Figura 19 (los valores también se incluyen en la Tabla 10).

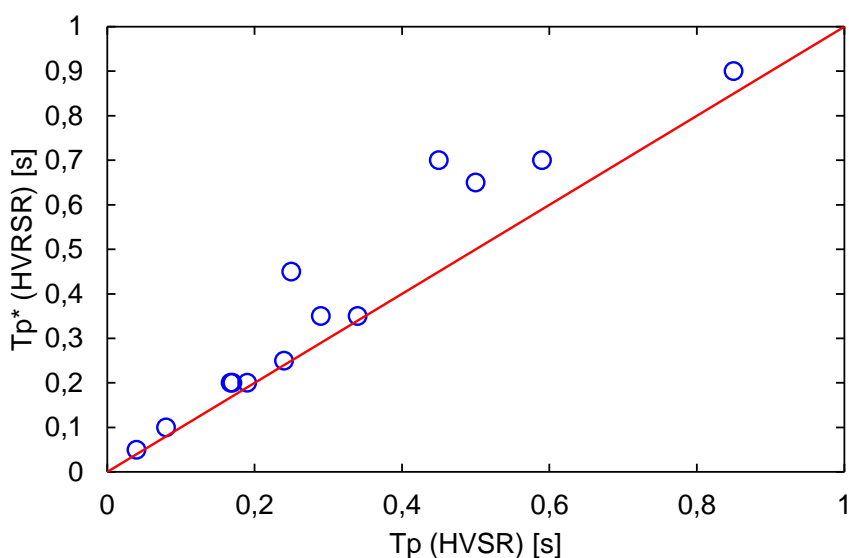


Figura 19 – Comparación entre periodo predominante de razones espectrales H/V de vibraciones ambientales y espectros de respuesta.

En la Figura 19 se pueden apreciar valores consistentes entre ambos métodos, especialmente para los periodos bajos (menores a 0,4 s). En el caso de la estación C010, se consideró el periodo asociado al segundo peak de la curva HVSR de vibraciones ambientales ($T_P = 0,17$ s), puesto que este es comparable tanto con el periodo de HVRSR como con el valor obtenido de la curva HVSR del terremoto de Illapel 2015, asociado con el segundo peak mostrado en la Figura 14.

A partir de la comparación de valores, es posible determinar que ambos métodos son equivalentes para las estaciones sismológicas de la Región de Coquimbo, por lo tanto, los resultados futuros emplean la clasificación de Idini et al. (2016) a partir de T_P .

Tabla 10 – Periodo predominante del suelo de acuerdo al máximo de las curvas HVSR.

Estación	Ubicación	Tipo HVSR	Periodo Max HVSR [s]			T _P * [s]
			T _{PS}	T _{PT}	T _P	
C010	Las Compañías	2 peaks	0,87	0,23	0,77	0,2
C050	Punitaqui	Banda	-	S/R	-	S/I
C070	Illapel	1 peak	0,22	S/R	0,17	0,2
C090	La Higuera	1 peak	0,18	0,19	0,19	0,2
C110	Monte Patria	1 peak	0,32	0,33	0,29	0,35
C120	Canela Baja	1 peak	0,10	S/R	0,08	0,1
C130	Limarí	1 peak	0,51	S/R	0,45	0,7
C190	Las Tacas	1 peak	0,06	0,05	0,04	0,05
C200	Hospital Coquimbo	1 peak	0,94	0,88	0,85	0,9
C220	UCN Guayacán	Plano	-	-	-	0,25
C260	Tongoy	1 peak	0,67	0,75	0,59	0,7
C330	Estadio La Portada	1 peak	0,28	0,39	0,34	0,35
CO02	Obs. Cruz del Sur	1 peak	0,28	S/R	0,25	0,45
CO03	Pedregal	Banda	-	-	-	0,15
CO06	Parque Fray Jorge	1 peak	0,22	0,21	0,24	0,25
GO04	Obs. Cerro Tololo	1 peak	0,61	0,86	0,50	0,65

NOTA: T_{PS}: Periodo predominante determinado a partir de sismos. T_{PT}: Periodo predominante determinado a partir del terremoto de Illapel 2015. T_P: Periodo predominante determinado a partir de vibraciones ambientales. T_P*: Periodo predominante determinado a partir de la razón de espectros de respuesta. **S/R**: Sin Registro de aceleraciones del terremoto de Illapel 2015. **S/I**: Sin Información.

3.5 Espectro de Respuesta en Aceleraciones

A modo de complemento de la información que puede ser obtenida de los registros de aceleraciones sísmicas en cada estación, se calcularon de igual manera los espectros de respuestas asociados al suelo de las 16 estaciones que cuentan con tal información.

3.5.1 Cálculo de los Espectros

En cuanto a la metodología de generación de curvas espectrales, esta responde al método de aceleraciones promedio, aplicado a cada componente por separado, asumiendo un modelo de un grado de libertad amortiguado ($\beta = 0.05$) con un comportamiento elástico-lineal en la respuesta tensión-deformación. Los pasos de cálculo son los siguientes:

1. Se calcula la intensidad de Arias de cada componente, y se cortan los registros entre el 5% y el 95% de la intensidad acumulada.
2. Se filtran los registros recortados, usando un filtro de tipo pasabanda “*Butterworth*” entre los 0.2 y 25 Hz (0.04 y 5 s).
3. Se normalizan los registros por la aceleración máxima (PGA: *peak ground acceleration*) en cada componente de la aceleración.
4. Finalmente, se calculan los espectros para cada componente aplicando el método de aceleraciones promedio sobre el registro normalizado (Chopra, 2011).

Una vez aplicados los 4 pasos, se grafica el resultado y se continúa con el siguiente evento en la estación correspondiente, para posteriormente calcular el promedio y la desviación estándar de todos los espectros para cada periodo o frecuencia de vibración. Esto permite, de manera alternativa al método de razones espectrales, determinar aquel periodo de mayor amplificación, es decir, el periodo predominante del suelo.

3.5.2 Espectro de Respuesta por Componentes

Siguiendo la metodología en el punto anterior, se confeccionó la Figura 20, cuyos gráficos resaltan el espectro correspondiente al Terremoto de Illapel 2015 (en rojo). Para cada estación se muestran las componentes horizontales EW, NS y vertical (Z).

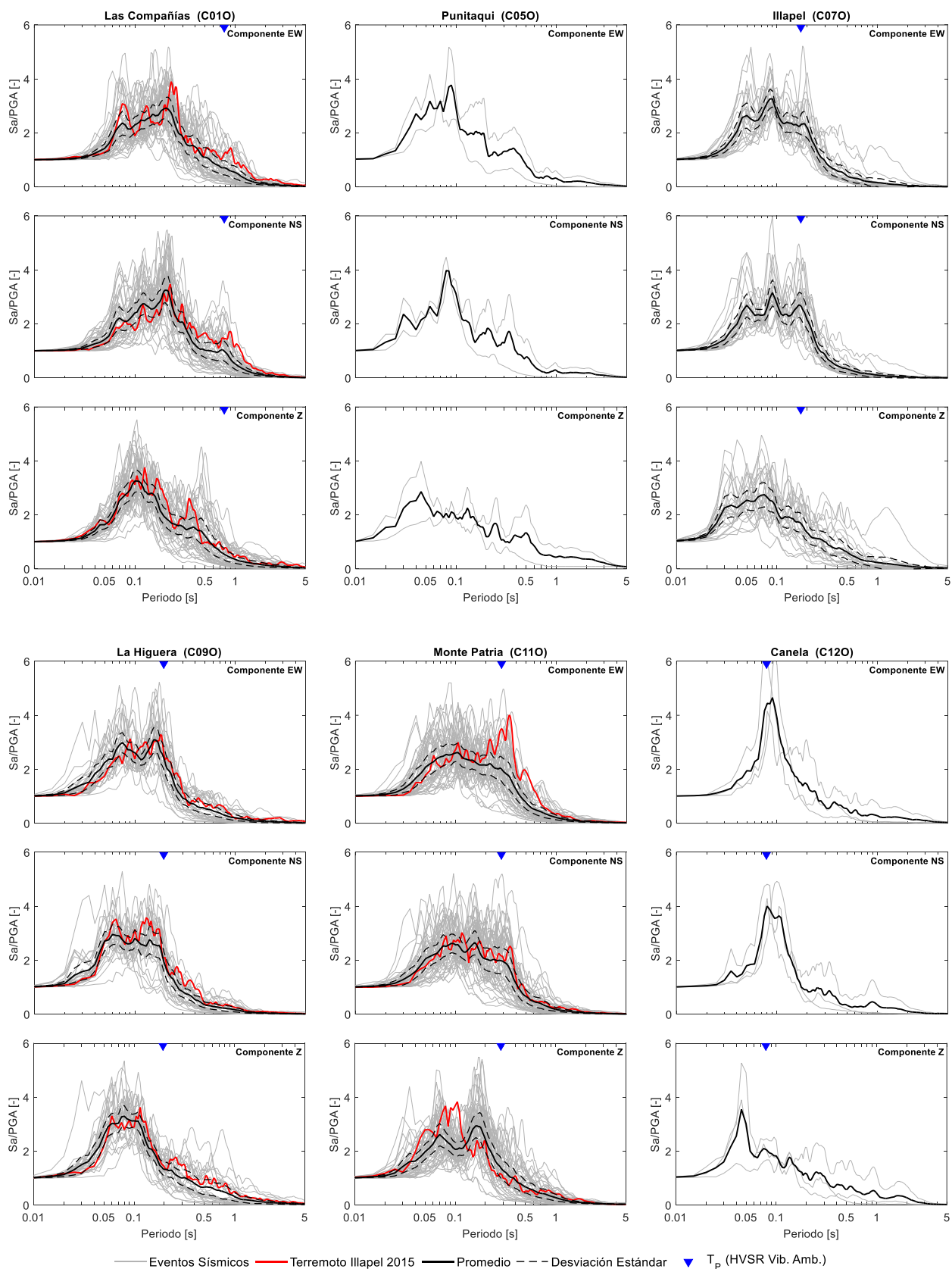


Figura 20 – Resultados de espectros de respuesta en aceleraciones por componentes espaciales en estaciones con registros sísmicos.

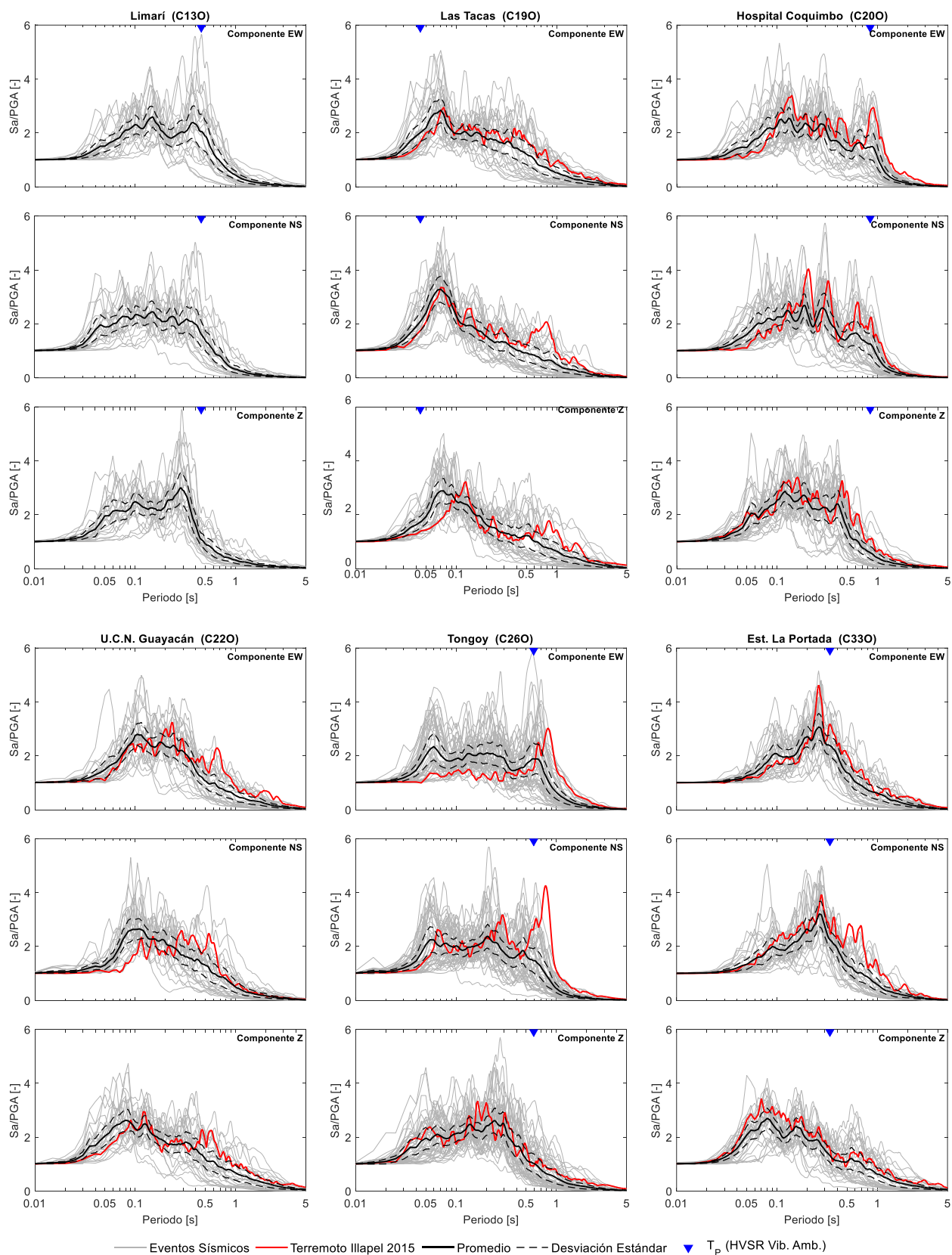


Figura 20 (continuación) – Resultados de espectros de respuesta en aceleraciones por componentes espaciales en estaciones con registros sísmicos.

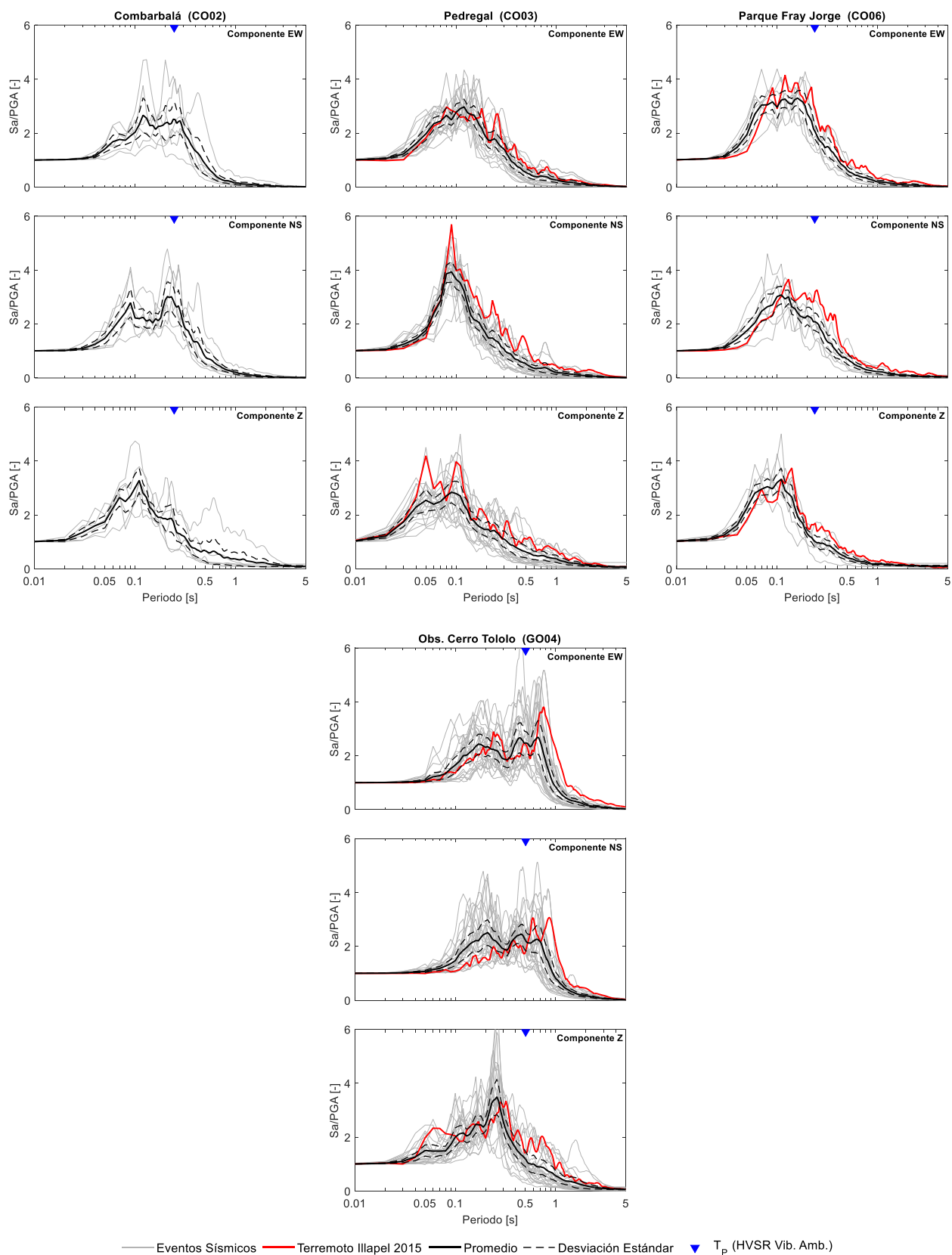


Figura 20 (continuación) – Resultados de espectros de respuesta en aceleraciones por componentes espaciales en estaciones con registros sísmicos.

3.6 Perfiles de Velocidad de Onda de Corte (Vs)

Con el propósito de profundizar el análisis de las mediciones de vibraciones ambientales como técnica geofísica, se propone una estimación de perfiles de velocidad de onda de corte en profundidad en algunas estaciones. Una de las ventajas de generar tales perfiles es ampliar la caracterización de los sitios en estudio, permitiendo una estimación de la cantidad de estratos y sus espesores.

A continuación se presenta la metodología empleada, el resultado de su aplicación y una estimación del parámetro V_{s30} , a partir del perfil propuesto, para 4 sitios distintos (Las Compañías, Limarí, Tongoy y Estadio La Portada), los cuales cuentan con estaciones sismológicas además de las mediciones de vibraciones ambientales. Solo se consideraron estas localidades donde se pudieron obtener curvas de dispersión mediante la técnica de correlación cruzada.

3.6.1 Metodología de Inversión

Para generar perfiles de velocidad de onda de corte, se empleó la extensión Dinver[®] del software Geopsy[®], siguiendo los pasos que se detallan a continuación.

1. Generación de curvas de dispersión: Estas curvas se obtienen aplicando la técnica de correlación cruzada de ruido sísmico entre dos sensores Tromino[®], basándose en la estimación de la función empírica de Green cuando se tiene registros simultáneos de vibraciones ambientales (Sáez, 2016; Pasten et al., 2016). Las curvas de dispersión obtenidas se muestran en la Figura 21.
2. Cálculo de curva de dispersión promedio. En primer lugar, se eliminan los resultados fuera de tendencia y posteriormente, se calcula un promedio de las curvas en el rango máximo de frecuencias permitido por los registros.
3. Definición de curvas objetivo. Las curvas objetivo son aquellas que el software Dinver comprueba luego de generar cada perfil, determinando así el nivel de error de la inversión. Las curvas objetivo son la curva promedio de dispersión y la HVSR de vibraciones ambientales, que se impone como indicador de elipticidad de las ondas Rayleigh.
4. Definición de estratos de suelo y sus propiedades. Cada estrato requiere de 5 propiedades iniciales que tienen por objetivo acotar la búsqueda de perfiles consistentes. Se requiere definir los siguientes rangos de búsqueda para cada capa: (1) espesor geométrico, (2) velocidad de onda P, (3) coeficiente de Poisson, (4) velocidad de onda de corte y (5) peso específico. El modelo empleado por el software Dinver requiere definir uno de los estratos como semiespacio, es decir, una capa inferior de extensión infinita en profundidad con propiedades constantes.

En el caso particular de este trabajo se dejaron constantes para todos los casos y todas las capas el rango de coeficientes de Poisson entre 0,2 y 0,5, como valores típicos y aceptados para suelos, y la densidad en un valor fijo de 2 ton/m^3 por ser parámetros con baja sensibilidad en el análisis (Sáez, 2016). Además, para los casos de las estaciones C01O y C33O se contaba con información de sondajes de 30 m

provista por RyV Ingenieros Asociados, lo que permitió definir los espesores de las capas superiores de los perfiles. Otros dos supuestos importantes en el cálculo son que ambas velocidades de onda son constantes en cada estrato y que aumentan en profundidad.

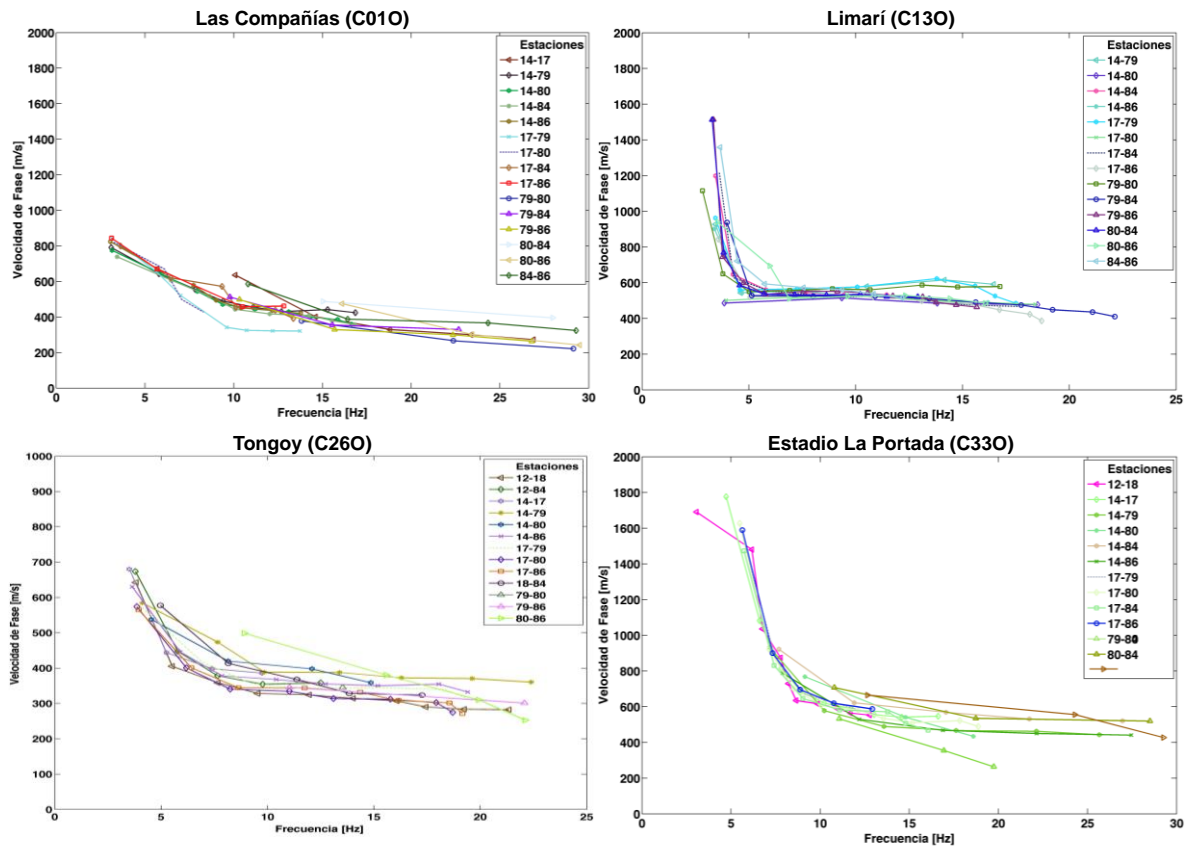


Figura 21 – Curvas de dispersión generadas mediante el método de correlación cruzada de ruido sísmico para cada par de Trominos utilizados. Los números en la leyenda “Estaciones” corresponden a un código interno del equipo (Gentileza de Miguel Sáez).

5. Generación de perfiles. Se ejecutan simulaciones Monte Carlo con 500.000 perfiles independientes y aleatoriamente distribuidos dentro de los rangos definidos anteriormente. El software calcula, para cada perfil, la curva de dispersión y la elipticidad teóricas para compararlas con las curvas objetivo.
6. Elección de modelos. Se eligen los modelos que poseen un error de ajuste (*misfit*) como máximo 1,5 veces mayor al mínimo *misfit* encontrado. Este criterio implica que el nivel de confianza de los modelos es del orden de 90%, asumiendo que la cantidad de perfiles simulados generan una distribución probabilística chi-cuadrado, lo que implica que la relación entre un *misfit* cualquiera y el mínimo siga una distribución de Fisher (Sáez, 2016). Además, se evalúa criteriosamente y de forma visual que tanto la dispersión como la elipticidad de los modelos escogidos, sea consistente con las curvas objetivo. De no ser satisfactorio el resultado, se procede a repetir el procedimiento desde el punto 4, modificando los parámetros de búsqueda de los modelos hasta que sean consistentes con las mediciones de vibraciones ambientales.

A modo de ejemplo, la Figura 22 muestra el resultado del procedimiento aplicado a la estación de Limarí (C13O) y los gráficos obtenidos en Dinver. En la Figura 22a se observa una primera búsqueda con rangos amplios en las variables, asumiendo un perfil con 2 estratos de suelo y un semiespacio con propiedades de roca. En cambio, en la Figura 22b se exhiben los resultados del ajuste con parámetros en rangos más acotados y que fueron seleccionados en base al comportamiento evidenciado en la Figura 22a.

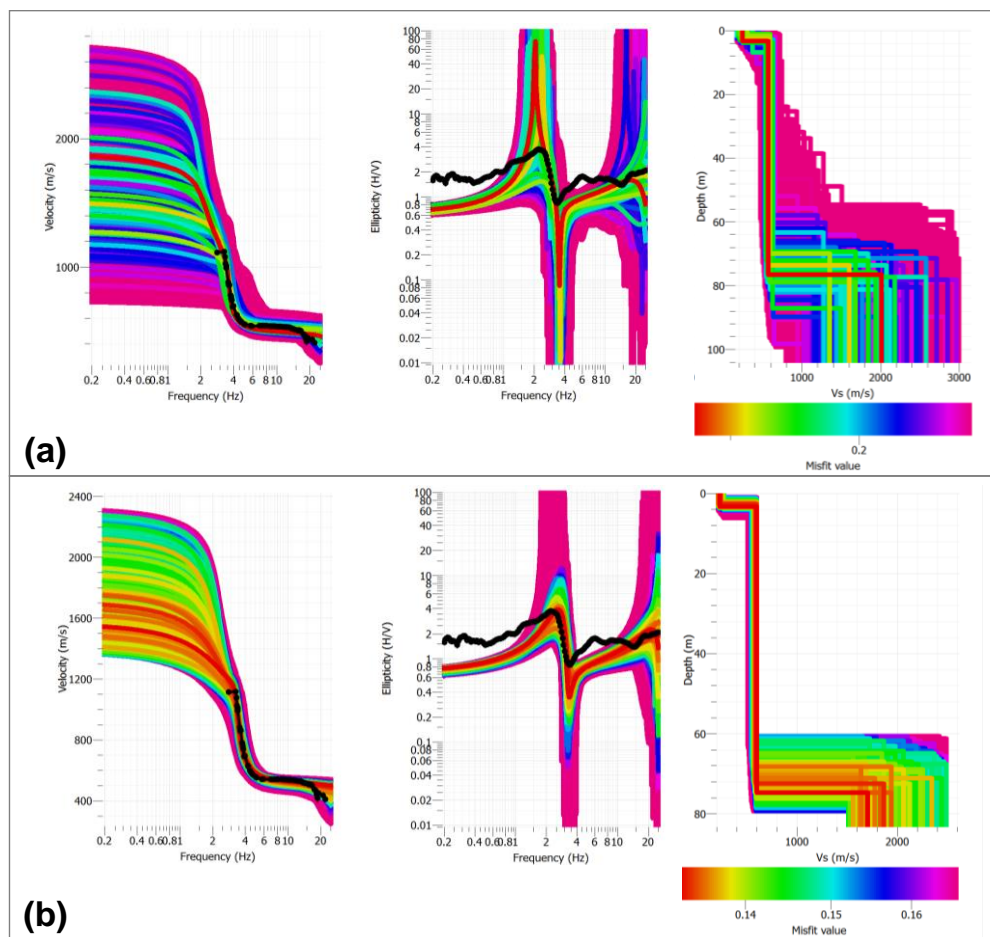


Figura 22 – Ejemplo de inversión de perfiles de velocidad V_s a partir de un ajuste de parámetros de los estratos de suelo y condicionado a curvas de dispersión y elipticidad. (a) Representa un ajuste grueso inicial y (b) el ajuste final de mayor precisión.

Es importante notar que la técnica de generación de perfiles en Dinver requiere asumir que los estratos son perfectamente horizontales, y que no considera efectos 3D del sitio. En consecuencia, representa una estimación práctica, pero no necesariamente precisa.

3.6.2 Perfiles Vs en Profundidad

La Figura 23 muestra los resultados de aplicar la metodología de inversión descrita en el punto anterior, exhibiendo las imágenes directamente obtenidas de Dinver, para todas las estaciones o localidades que cuentan con datos suficientes para aplicar la técnica.

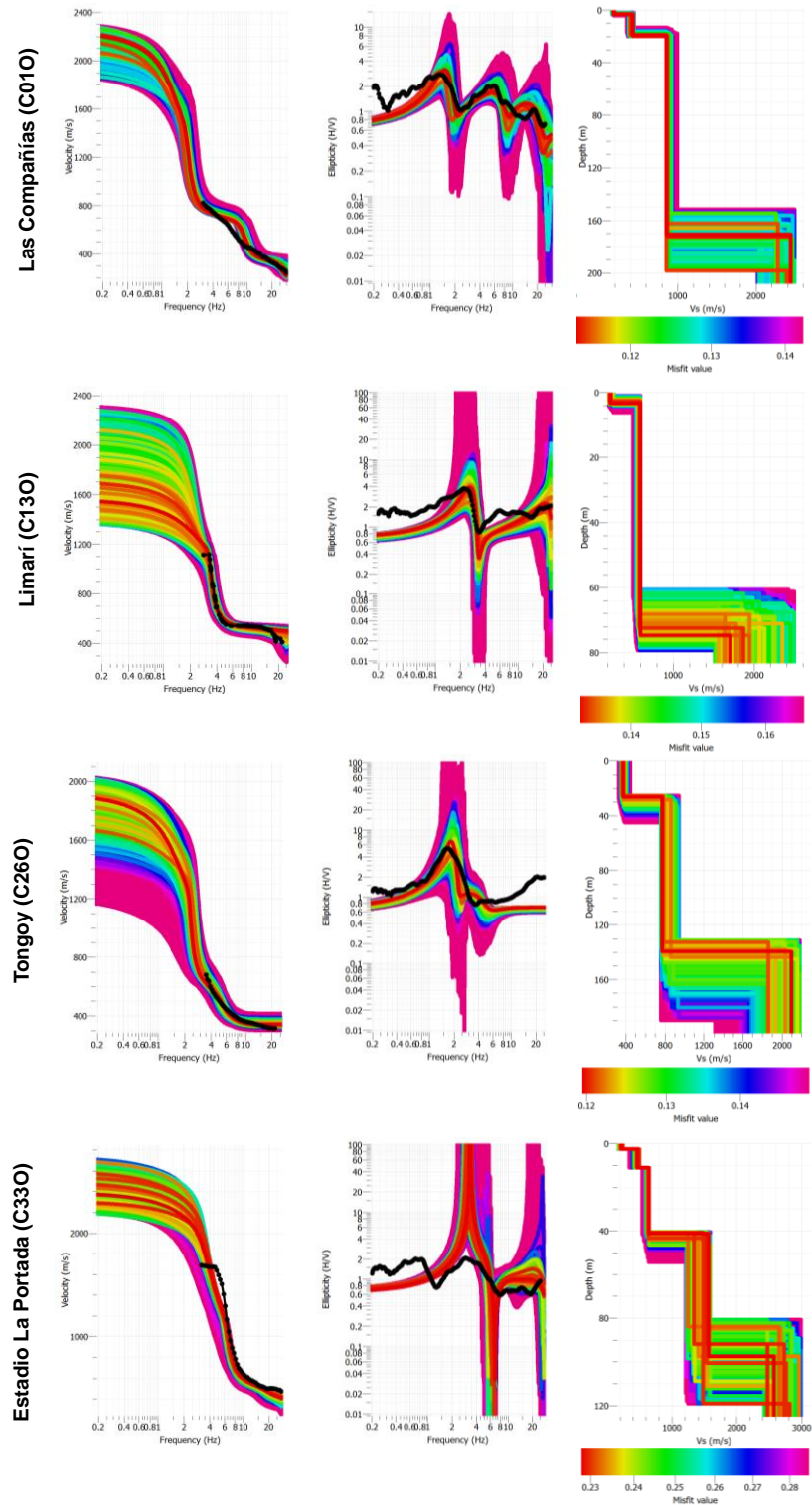


Figura 23 – Resultados de ajustes en curva de dispersión medida y razones espectrales H/V para generar perfiles de velocidad de ondas de corte.

A continuación, en la Figura 24 se muestran los perfiles Vs para las 4 estaciones analizadas, con una confiabilidad del orden del 90%, en los que destaca el perfil más probable en negro.

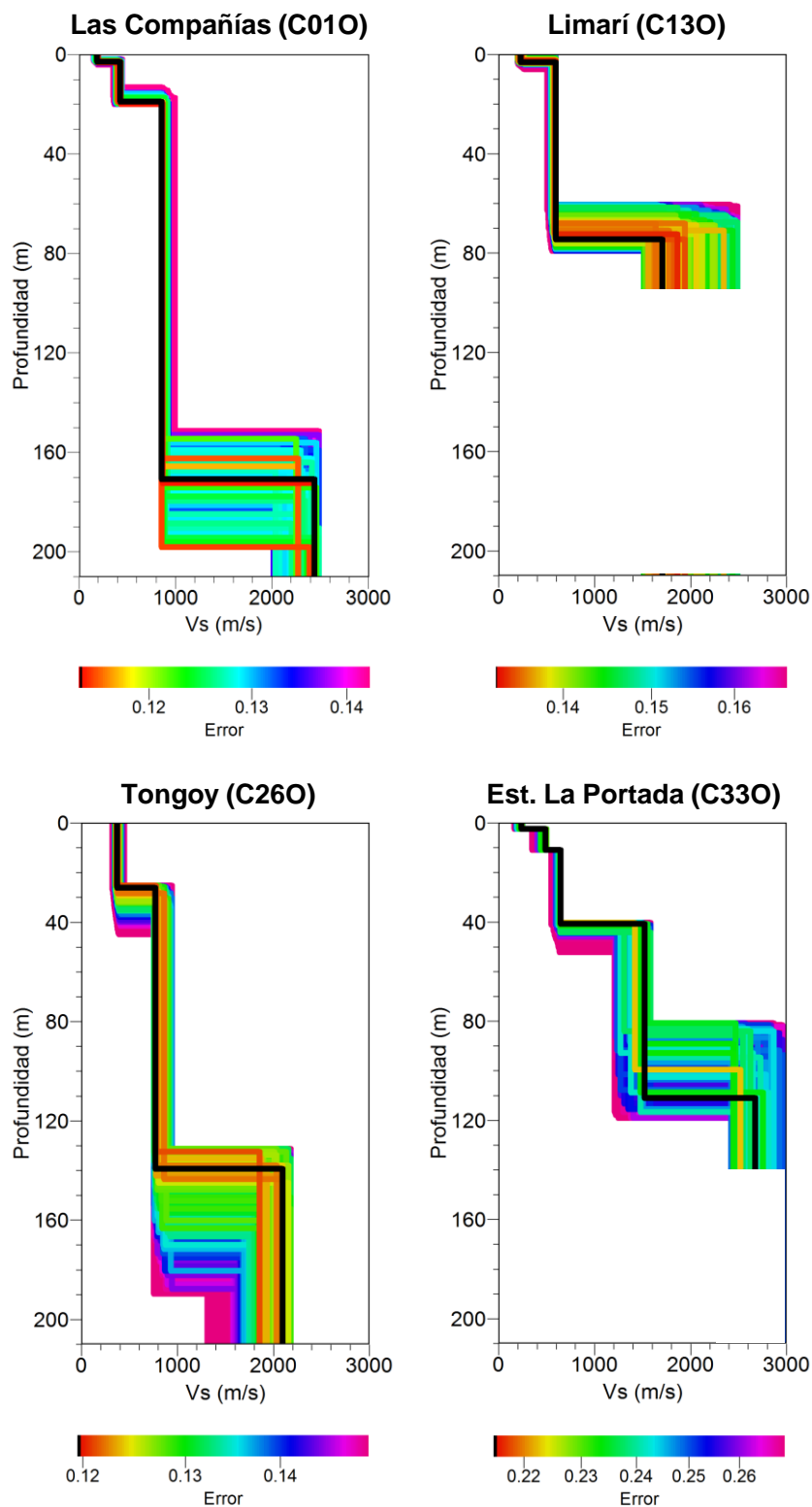


Figura 24 – Perfiles de velocidad de onda de corte en profundidad en sitios de estaciones sísmológicas.

3.6.3 Cálculo Parámetro V_{S30}

A partir de los perfiles de velocidad V_s de la Figura 24 se estimaron los parámetros V_{S30} de cada estación usando la Ecuación (2) y los resultados se listan en la Tabla 11.

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_i \frac{H_i}{V_{S_i}}} \quad (2)$$

Los valores permiten clasificar al suelo de cada estación, evaluación que se desarrolla en el punto siguiente.

Tabla 11 – Parámetro V_{S30} de estaciones con perfiles de velocidad.

Estación	Ubicación	V_{S30} [m/s]
C010	Las Compañías	450
C130	Limarí	510
C260	Tongoy	400
C330	Estadio La Portada	525

3.7 Clasificación de Suelos

Durante la revisión bibliográfica se describieron dos criterios de clasificación de suelos, ambos con distintos enfoques y relevantes para corroborar la hipótesis inicial sobre la rigidez del subsuelo en la Región de Coquimbo. A continuación, en la Tabla 12 es posible ver la clasificación de cada estación de acuerdo a la información disponible y calculada previamente en las Secciones 3.4 y 3.6.3.

Notar que la clasificación de Idini et al. (2016) está hecha en base al periodo predominante de HVSR de vibraciones ambientales (T_P), de acuerdo a lo establecido en la Sección 3.4.2, a diferencia del método original, que es con HVRSR a partir de eventos sísmicos.

Tabla 12 – Clasificación de suelos de la Región de Coquimbo en base a su periodo predominante y V_{s30} .

Estación	Ubicación	Idini et al. (2016)			NCh433 Of.96 + DS61	
		Tipo HVSR	T_P [s]	Clase	V_{s30} [m/s]	Tipo
C010	Las Compañías	2 peaks	0,77	VI	450	C
C040	La Serena	2 peaks	1,17	V		
C050	Punitaqui	Banda	-	VI		
C070	Illapel	1 peak	0,17	II		
C090	La Higuera	1 peak	0,19	II		
C110	Monte Patria	1 peak	0,29	III		
C120	Canela Baja	1 peak	0,08	II		
C130	Limarí	1 peak	0,45	IV	510	B
C160	Caleta San Pedro	1 peak	0,77	IV		
C190	Las Tacas	Plano	-	I		
C200	Hospital Coquimbo	1 peak	0,85	V		
C220	UCN Guayacán	Plano	-	I		
C260	Tongoy	1 peak	0,59	IV	400	C
C330	Estadio La Portada	1 peak	0,34	III	525	B
CO02	Obs. Cruz del Sur	1 peak	0,25	III		
CO03	Pedregal	Banda	-	VI		
CO05	Cerro Tololo - LS	Plano	-	I		
CO06	Parque Fray Jorge	1 peak	0,24	III		
GO04	Obs. Cerro Tololo	1 peak	0,50	IV		
-	Ovalle (Valle)	1 peak	0,96	V		
-	Ovalle (Terraza)	2 peaks	1,11	VI		
-	Combarbalá (S1)	1 peak	0,98	V		
-	Combarbalá (S2)	3 peaks	0,75	VI		
-	Los Vilos	2 peaks	0,83	VI		
-	Salamanca	1 peak	0,43	IV		

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DE DAÑOS

El estudio de los daños evidenciados en la infraestructura civil durante un terremoto contribuye a la caracterización y comprensión de los fenómenos tectónicos y sus efectos. Por la misma razón, cuando se comparan dos lugares con construcciones similares ante la excitación de un evento sísmico de distancia hipocentral aproximadamente equivalente, es posible identificar condiciones locales y/o efectos de sitio si los daños documentados son distintos.

La metodología adoptada para estimar el daño en la Región corresponde a la versión modificada por los profesores Astroza y Monge (1989) de la escala de intensidades MSK.

El fin del presente capítulo corresponde a la evaluación de daños, mediante la escala de intensidad MSK, de los efectos del terremoto de Illapel 2015 en la Región de Coquimbo, contrastando la distribución de intensidades con las del terremoto de Punitaqui 1997. En primer lugar, se revisan las estadísticas generales de los daños ocurridos para, posteriormente, proceder al cálculo de las intensidades y la generación de mapas de su distribución.

4.1 Daños Catastrados producto del Terremoto Illapel 2015

Luego de ocurrido el terremoto, se ejecutaron visitas técnicas a la Región, en las que se pudo evidenciar daños en distintos tipos de infraestructura, tal y como se detalló en la Sección 2.2.3. Algunos ejemplos se muestran en la Figura 25, donde se aprecia daño estructural importante como grietas horizontales en tímpanos y antetechos o grietas verticales en encuentros de muros en Iglesias de adobe, además de viviendas en condiciones de inhabitabilidad o incluso derrumbe completo.

La información que permitió el análisis reportado en este estudio proviene de una encuesta gubernamental que realizó el Ministerio de Vivienda y Urbanismo dentro del mes posterior a la ocurrencia del evento principal (septiembre de 2015). La encuesta tiene fines de programación y distribución de recursos para reparación y reconstrucción de las viviendas emplazadas en la zona afectada por el sismo y el posterior tsunami, cuya muestra se compone de 9.317 viviendas evaluadas, de las cuales 7.285 presentaron algún nivel de daño (ver Tablas 13 y 14).



Figura 25 – Fotografías evidenciando daño provocado por el terremoto de Illapel 2015 en algunas localidades de la Región: (a) Iglesia de Monte Patria, (b) vivienda en Illapel, (c) Iglesia en Pedregal y (d) vivienda en Ovalle (Tomadas en enero 2016).

Tabla 13 – Cantidad de viviendas según nivel de daño clasificadas por materialidad (MINVU, 2015).

Tipología Vivienda	Sin Daño	Daño Reparable			No Reparable	Total
		Leve	Moderado	Mayor		
Casa	1.999	1.703	1.694	1.893	1.921	9.210
Adobe	75	225	462	795	1.176	2.733
Albañilería	757	574	503	370	163	2.367
Hormigón Armado	13	13	18	18	13	75
Madera	412	231	115	115	138	1.011
Otro	49	39	36	31	38	193
N/R	693	621	560	564	393	2.831
Departamento	33	26	14	34	0	107
Albañilería	10	3	8	1	0	22
Hormigón Armado	23	23	6	33	0	85
Total	2.032	1.729	1.708	1.927	1.921	9.317

Tabla 14 – Cantidad de viviendas según nivel de daño por provincia y comuna (MINVU, 2015).

Provincia / Comuna	Sin Daño	Daño Reparable			No Reparable	Total
		Leve	Moderado	Mayor		
Choapa	1.257	957	713	687	732	4.346
Canela	432	220	186	203	350	1.391
Illapel	472	545	377	336	210	1.940
Los Vilos	8	17	8	5	7	45
Salamanca	345	175	142	143	165	970
Elqui	141	195	293	351	271	1.251
Andacollo	2	8	18	34	28	90
Coquimbo	136	150	174	189	120	769
La Serena	1	7	11	23	28	70
Paihuano	0	7	9	15	33	64
Vicuña	2	23	81	90	62	258
Limarí	634	577	702	889	918	3.720
Combarbalá	42	69	95	136	244	586
Monte Patria	185	166	243	272	360	1.226
Ovalle	90	167	191	224	202	874
Punitaqui	152	97	95	152	69	565
Río Hurtado	165	78	78	105	43	469
Total	2.032	1.729	1.708	1.927	1.921	9.317

A partir de los datos de la encuesta, es posible verificar que la distribución de los porcentajes asociados a cada nivel de daño son similares cuando se considera el global de la encuesta, vale decir el estado de cada una de las 9.317 viviendas (Figura 26a). Luego, al desglosar los valores se encuentra que la concentración de los perjuicios se dio mayoritariamente en las provincias de Limarí y Choapa, en el centro y sur de la Región, mientras que la provincia de Elqui no participa más que con el 15% del total (Figura 26b). Asimismo, en la Figura 26c se puede apreciar que el material que resultó más afectado fue el adobe, aunque el nivel de incertidumbre en la determinación de la materialidad de las viviendas catastradas podría afectar dicha condición.

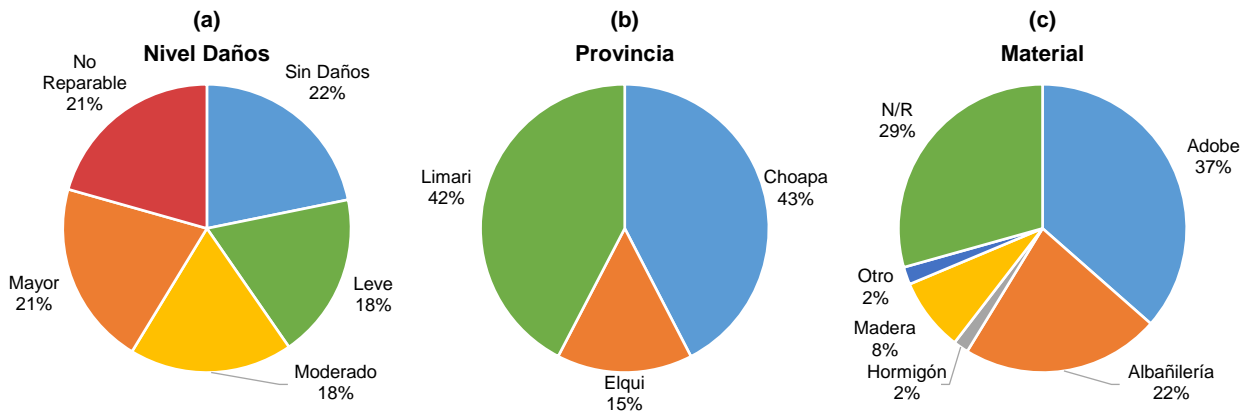


Figura 26 – Distribución porcentual de: (a) niveles de daños en las 9.317 viviendas catastradas, (b) las 7.285 viviendas dañadas en cada provincia de la Región y (c) las 7.285 viviendas dañadas clasificadas de acuerdo a su material de construcción.

En cuanto a la distribución comunal de la totalidad de viviendas, es posible notar inmediatamente el efecto del evento en las comunas con menor distancia hipocentral (Figura 27), es decir, Canela, Illapel y Combarbalá, además de altos niveles de daño en Río Hurtado, Monte Patria y Punitaqui, lo que podría indicar efectos de sitio en dichas áreas. También se observa gran cantidad de viviendas dañadas en Coquimbo y Ovalle, sin embargo, al revisar el porcentaje relativo al total se encuentra que no son valores significativos en comparación a las demás comunas.

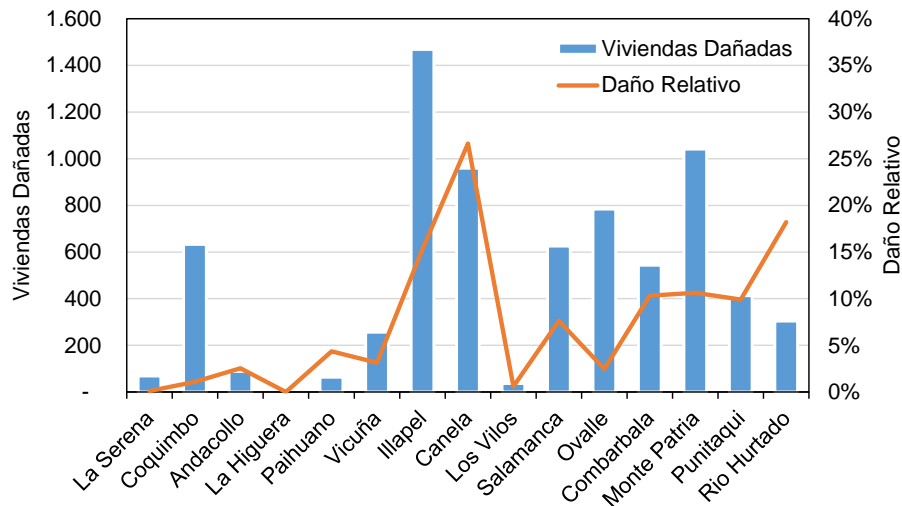


Figura 27 – Cantidad de viviendas con algún nivel de daño distribuidas por comuna y porcentaje relativo al total de viviendas en cada localidad.

4.2 Estimación de Intensidades MSK en viviendas de Adobe

4.2.1 Elección del Material de Análisis

El material escogido para realizar las estimaciones de intensidades MSK es el Adobe (viviendas tipo A), dada la cantidad de datos disponibles. Esto porque el catastro de daños fue creado con propósitos gubernamentales y sociales, respondiendo a una necesidad distinta a la exclusivamente estructural, y donde se considera una clasificación de solo 5 niveles de daños: (1) sin daños, (2) daños reparables leves, (3) daños reparables moderados, (4) daños reparables mayores y (5) daños no reparables. El objetivo de este catastro fue la distribución de recursos para reparación y reconstrucción de la zona afectada, y aun cuando fue llevado a cabo por profesionales competentes como arquitectos, constructores e ingenieros, sigue manteniendo una finalidad conceptualmente distinta. Sin embargo, la metodología MSK posee una compatibilidad con datos de este tipo gracias a una homologación en la categorización de daños realizada por Díaz (2001), para el terremoto de Punitaqui 1997, la que se centra únicamente en el Adobe porque se consideró un material representativo en su momento.

Junto con lo anterior, la elección se valida al considerar que las estructuras de adobe manifiestan un comportamiento rígido con periodos predominantes de vibración menores a 0.3 s (Morales et al., 1980), por lo que se espera que sean más sensibles a los periodos predominantes de los suelos reportados en la Tabla 12.

4.2.2 Intensidades del Terremoto de Illapel 2015

De acuerdo a la información disponible, la encuesta MINVU y la base de datos del Censo 2012 que indica la totalidad de viviendas en la Región, se calcularon las intensidades MSK a nivel local con objeto de detectar eventuales efectos de sitio.

Para tal efecto, se aplicó la metodología MSK, adaptada por Astroza y Monge (1989) y modificada por Díaz (2001) para viviendas tipo A (adobe) y que considera una encuesta con 5 niveles de daños, lo que determina finalmente el grado de intensidad MSK 2015 de la Tabla 15. El detalle del procedimiento se explica a continuación.

1. Se cruza la información del Censo y la encuesta MINVU, de forma tal que se pueda determinar un nivel de desagregación geográfica común a ambos instrumentos. En este caso se empleó el nivel Distrito Censal por ser el menor posible del Censo en el que se pueden reconocer una o más localidades y por ende ser consistente con las definidas en la encuesta.
2. Se totalizan las categorías de daños registradas en viviendas de adobe y se descuentan de la cantidad indicada por el Censo, resultado que se considera como el estado Sin Daños. Luego, a cada categoría se le asocia un porcentaje acumulado de todos los aportes de los niveles de daño previos más el propio.
3. Se grafica la curva de distribución porcentual de los grados de daño real en conjunto con las patrones. El grado asignado corresponde al patrón inmediatamente inferior, mientras que la determinación del $\frac{1}{2}$ grado, si es que procede, se realiza mediante método de interpolación de áreas (Menéndez, 1991).

A modo de ejemplo, la aplicación del método de interpolación de áreas implica que la intensidad queda determinada de acuerdo con la Ecuación (3), redondeando a $\frac{1}{2}$ grado. Esto quiere decir que si el cociente de áreas es menor a 0,25 entonces la asignación queda valorizada en 6, en caso de encontrarse entre 0,25 y 0,75 la intensidad será 6,5 y en el último caso el valor será 7 (en los casos de la Figura 28). Cabe notar que el cociente de áreas es un número entre 0 y 1.

$$I_{real} = 6 + \frac{A_{VI} - A_{real}}{A_{VI} - A_{VII}} \quad (3)$$

En la Figura 28 se muestran ejemplos en los que se determina el valor de intensidad para varias localidades.

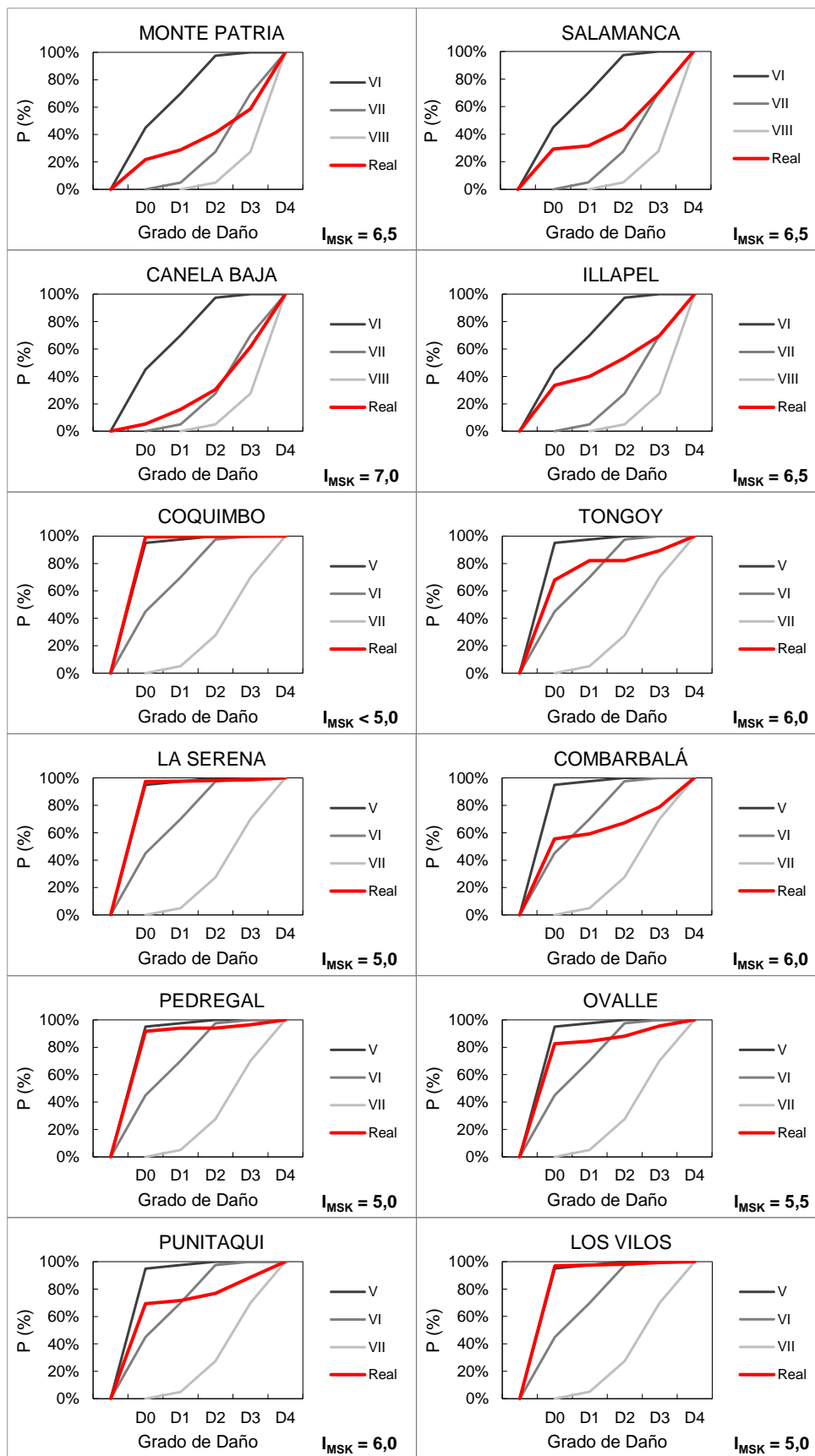


Figura 28 – Ejemplo de determinación de intensidad MSK por medio de comparación con curvas patrón para múltiples casos, aplicando método de interpolación de áreas.

Los resultados de las intensidades se muestran en la Tabla 15 con detalle de cada localidad calculada.

Tabla 15 – Determinación de las Intensidades MSK a nivel local en cada distrito censal que cuenta con información del catastro del MINVU.

Comuna / Distrito	Viv. Adobe	Sin Daños	Daños				Total	MSK 2015
			Leve	Moderado	Mayor	Irreparable		
Canela								
Mincha	53	36	-	3	5	9	17	6
Huentelauquén	151	143	1	-	5	2	8	5
Puerto Oscuro	23	15	1	1	2	4	8	6
Espíritu Santo	105	65	-	1	11	28	40	6,5
Los Pozos	41	40	-	-	-	1	1	5
Canela Alta	131	11	9	26	29	78	142	7,5
Canela Baja	273	20	21	41	85	106	253	7
Agua Fría	72	22	-	3	7	40	50	7
Illapel								
Illapel	298	175	12	25	30	56	123	6
Los Vilos								
Los Vilos	169	164	1	1	2	1	5	5
Salamanca								
Arboleda Grande	37	30	-	-	1	6	7	6
El Tambo	15	14	-	-	-	1	1	5
La Jarilla	18	17	-	-	1	-	1	5
Salamanca	115	23	3	16	34	39	92	7
Tahuinco	16	11	-	3	1	1	5	6
Andacollo								
Andacollo	839	788	4	10	19	18	51	5
Coquimbo								
Coquimbo	1.996	1.983	2	5	4	2	13	< 5
El Peñón	25	23	1	-	1	-	2	5
Pan de Azúcar	129	123	1	1	3	1	6	5

Comuna / Distrito	Viv. Adobe	Sin Daños	Daños				Total	MSK 2015
			Leve	Moderado	Mayor	Irreparable		
Tambillos	33	32	-	-	-	1	1	5
Tierras Blancas	260	245	1	4	8	2	15	5
Tongoy	31	22	4	-	2	3	9	6
La Serena								
Las Rojas	87	83	-	1	1	2	4	5
Algarrobito	70	69	-	-	-	1	1	< 5
La Serena	269	250	3	2	9	5	19	5
Quebrada de Talca	60	59	-	-	-	1	1	< 5
Paihuano								
Paihuano	59	42	4	1	3	9	17	6
Pisco Elqui	124	117	-	3	3	1	7	5
Vicuña								
Peralillo	135	109	-	8	12	6	26	5,5
Diaguitas	62	57	1	2	2	-	5	5
El Molle	10	9	-	-	-	1	1	5,5
El Tambo	78	69	1	3	1	4	9	5,5
Marquesa	44	42	-	1	-	1	2	5
Rivadavia	68	65	-	-	-	3	3	5
San Isidro	207	198	2	1	6	-	9	5
Vicuña	370	313	3	14	25	15	57	5,5
Monte Patria								
Carén	162	140	0	3	10	9	22	5,5
Chañaral Alto	219	143	7	10	23	36	76	6
El Palqui	77	76	0	0	1	0	1	< 5
Guatulame	77	76	0	1	0	0	1	< 5
Monte Patria	195	51	13	23	32	76	144	6,5
Pedregal	55	48	2	0	2	3	7	5,5
Rapel	102	88	1	3	3	7	14	5,5
Tulahuén	220	122	5	6	37	50	98	6,5

Comuna / Distrito	Viv. Adobe	Sin Daños	Daños				Total	MSK 2015
			Leve	Moderado	Mayor	Irreparable		
Río Hurtado								
Hurtado	95	-	26	15	37	17	95	7
Pichasca	153	129	1	6	13	4	24	5,5
Serón	128	103	4	6	10	5	25	5,5
Ovalle								
Cerrillos	104	75	3	5	9	12	29	6
Guamalata	78	75	-	-	1	2	3	5
La Chimba	118	117	-	-	-	1	1	< 5
La Torre	55	37	-	8	4	6	18	6
Lagunillas	15	12	-	-	2	1	3	5,5
Limarí	69	68	-	-	-	1	1	< 5
Ovalle	619	511	11	23	46	28	108	5,5
Sotaquí	87	52	0	3	6	26	35	6,5
Combarbalá								
Cogotí	221	218	1	0	0	2	3	< 5
Combarbalá	650	401	21	45	64	119	249	6
Quilitapia	91	79	0	1	3	8	12	5,5
Punitaqui								
Punitaqui	285	220	5	11	25	24	65	6,0

4.3 Mapas de Distribución de Intensidades MSK

A partir de los valores reportados por Díaz (2001) y los de la Tabla 15 se generan mapas de distribución de intensidades para los terremotos de Punitaqui 1997 (Figura 29) e Illapel 2015 (Figura 30), respectivamente, usando un sistema de información geográfica, relacionando los valores MSK con la zona geográfica del distrito censal respectivo (distritos definidos cartográficamente como resultado del Pre Censo 2011). La escala de colores representa los distintos grados de intensidad y las zonas sin colorear aquellos distritos no cubiertos por la encuesta, considerados como Sin Información.

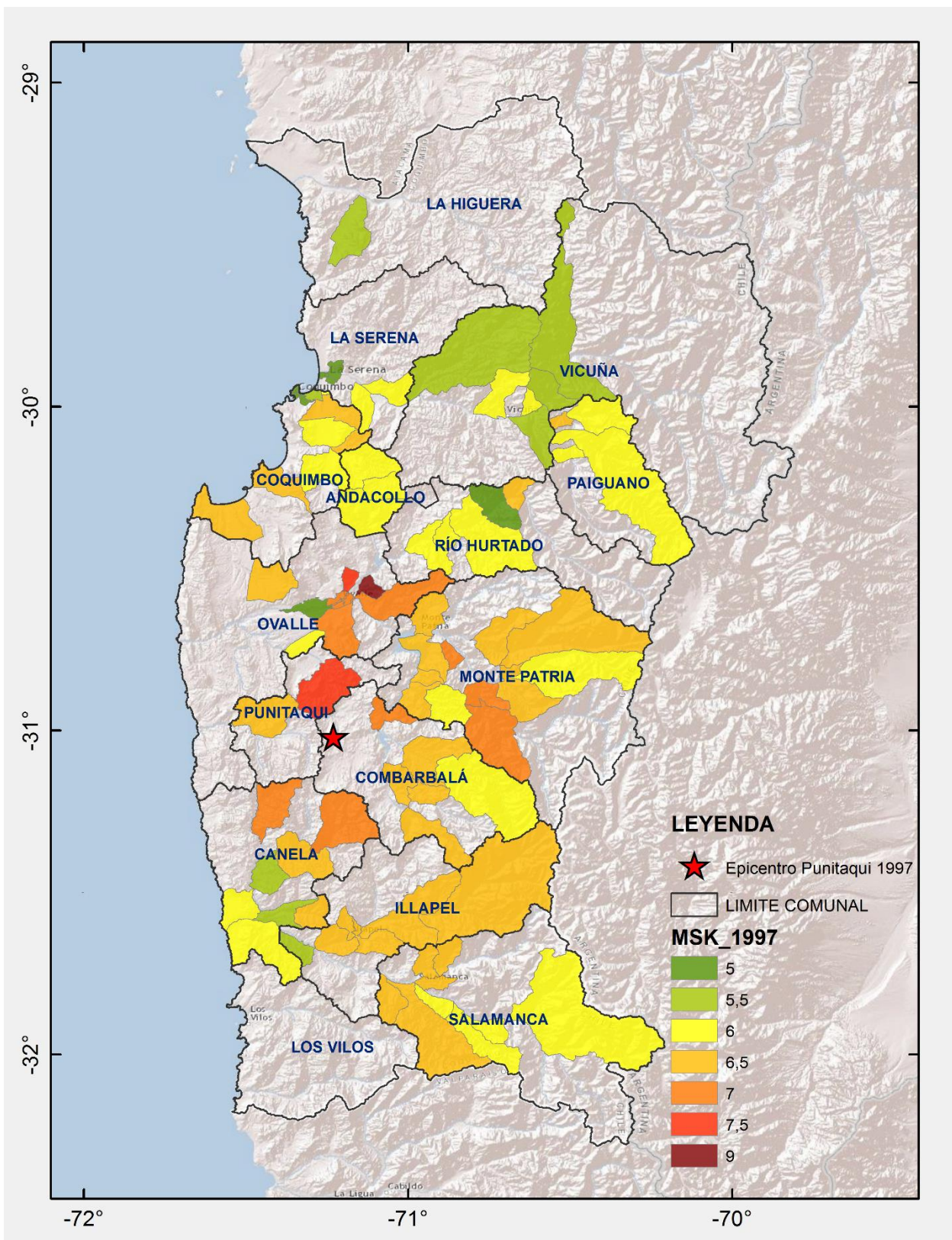


Figura 29 – Mapa de distribución de intensidades MSK para el terremoto de Punitaqui 1997 en viviendas de adobe de la Región de Coquimbo. Los valores fueron obtenidos de Díaz (2001).

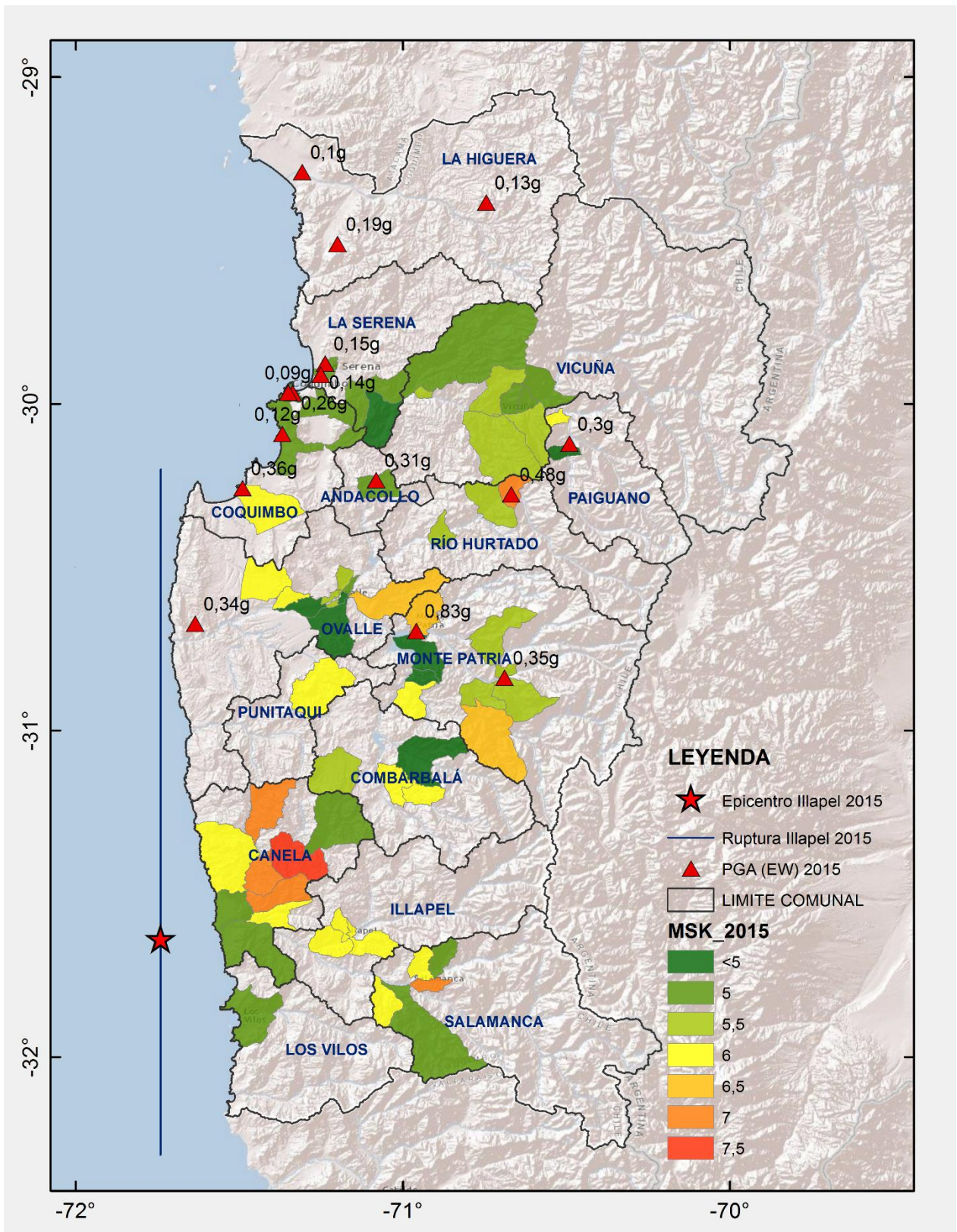


Figura 30 – Mapa de distribución de intensidades MSK para el terremoto de Illapel 2015 en viviendas de adobe de la Región de Coquimbo. Se incluyen los valores de aceleración máxima de suelo (PGA) de la componente EW registradas en las estaciones.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El presente capítulo se centra en analizar los principales resultados obtenidos en los Capítulos 3 y 4, además de complementarlos con los estudios descritos en el Capítulo 2, de tal forma de evaluar la consistencia teórica y práctica además de corroborar la hipótesis inicial del trabajo.

5.1 Resumen de Resultados Principales

Con el objeto de hacer más eficiente el análisis, se elaboró la Tabla 16, donde se muestran los principales resultados del trabajo y que, además, permiten las comparaciones entre localidades y la eventual detección de efectos de sitio.

Si bien es cierto que la mayoría de las estaciones sismológicas, y por ende sus localidades respectivas, se encuentran emplazadas sobre suelos, también es cierto que 12 de las 24 evaluaciones resultaron en una respuesta rígida de los depósitos, cuyo principal componente de formación son sedimentos aluviales probablemente de gran tamaño, como gravas o arenas, cualidad esperada en una Región dominada por cauces de ríos que reducen abruptamente su altitud entre Cordillera y Océano.

Esta situación es igualmente consistente al observar las intensidades MSK evaluadas para ambos terremotos, donde se constatan intensidades que no superan los VII-VIII grados, aun cuando fueron calculados a partir de los daños evidenciados en edificios de adobe, material que por lo general entrega intensidades superiores a las que se documenta en albañilería y hormigón armado (Astroza y Monge, 1989; Díaz, 2001; Zanini et al., 2016). Con las excepciones de Monte Patria e Illapel, todas aquellas localidades que exhiben intensidades repetidamente sobre 6 para ambos terremotos se encuentran sobre suelos de tipo IV o V, de acuerdo a la clasificación de Idini et al. (2016).

Tabla 16 – Resumen de resultados principales en estaciones y localidades de la Región de Coquimbo.

Estación	Ubicación	Comuna	Geología		Tipo HVSR	T _P (s)	V _{s30} (m/s)	Clase/ Tipo	I _{MSK} 1997	I _{MSK} 2015
C010	Las Compañías	La Serena	Qal	Suelo	2 peaks	0,77	450	VI C	5	5
C040	Cuartel SIAT	La Serena	Tec (Qal)	Suelo	2 peaks	1,17		V	5	5
C050	Punitaqui	Punitaqui	Qc (Kg)	Suelo	Banda	-		VI	7,5	6
C070	Illapel	Illapel	Qac/Tc (Ki1)	Suelo	1 peak	0,17		II	6,5	6,5
C090	La Higuera	La Higuera	Tega/Qal (Kg)	Suelo	1 peak	0,19		II	5,5	S/I
C110	Monte Patria	Monte Patria	Qal (Kv)	Suelo	1 peak	0,29		III	6,5	6,5
C120	Canela Baja	Canela	Qc/Jmi4	Suelo	1 peak	0,08		II	5,5	7
C130	Limarí	Ovalle	Qal (Qc)	Suelo	1 peak	0,45	570	IV B	5	< 5
C160	Caleta San Pedro	La Serena	Qal	Suelo	1 peak	0,77		IV	5	5
C190	Las Tacas	Coquimbo	Kt (Kg/QTm)	Roca	Plano	-	Act.	I	S/I	S/I
C200	Hospital Coquimbo	Coquimbo	Tec (JKg/Qal)	Suelo	1 peak	0,85	N/F	V	5	< 5
C220	UCN Guayacán	Coquimbo	JKg	Roca	Plano	-	Act.	I	5	< 5
C260	Tongoy	Coquimbo	Ja (Qal)	Suelo	1 peak	0,59	380	IV C	6,5	6
C330	Estadio La Portada	La Serena	Qal	Suelo	1 peak	0,34	500	III B	5	5
CO02	Obs. Cruz del Sur	Combarbalá	Oh (Combarbalita)	Roca	1 peak	0,25	Act.	III	N/A	N/A
CO03	Pedregal	Monte Patria	Qac (Kv/ah)	Suelo	Banda	-		VI	6,5	5,5
CO06	Parque Fray Jorge	Ovalle	Jgd (Jdn)	Roca	1 peak	0,24	Act.	I	N/A	N/A
GO04	Obs. Cerro Tololo	Vicuña	Kle (Kv)	Roca	1 peak	0,50	N/F	III	N/A	N/A
-	Ovalle	Ovalle	Qal/Qc (Kra/Ka)	Suelo	1 peak	0,96		V	7	5,5
-	Combarbalá	Combarbalá	Qal (Kqmc/Kqmt)	Suelo	1 peak	0,98		V	6,5	6
-	Los Vilos	Los Vilos	Qal (Jmi1/Dca)	Suelo	2 peaks	0,83		VI	S/I	5
-	Salamanca	Salamanca	Qac (Ki1)	Suelo	1 peak	0,43		IV	6,5	7

NOTA: N/F: No Funciona metodología de inversión. **Act.:** Requiere mediciones Activas. **S/I:** Sin Información. **N/A:** No Aplica. Simbología de geología en Tabla 1.

5.2 Degradación de Rigidez

A partir de la determinación de los periodos predominantes de vibraciones ambientales, del promedio de eventos sísmicos y del terremoto de Illapel 2015 para las estaciones sismológicas de la Figura 14 (mostrados en la Tabla 10) se pudo generar la Figura 31, la cual muestra a los dos últimos en función del primero para evaluar su tendencia respecto a la degradación de rigidez.

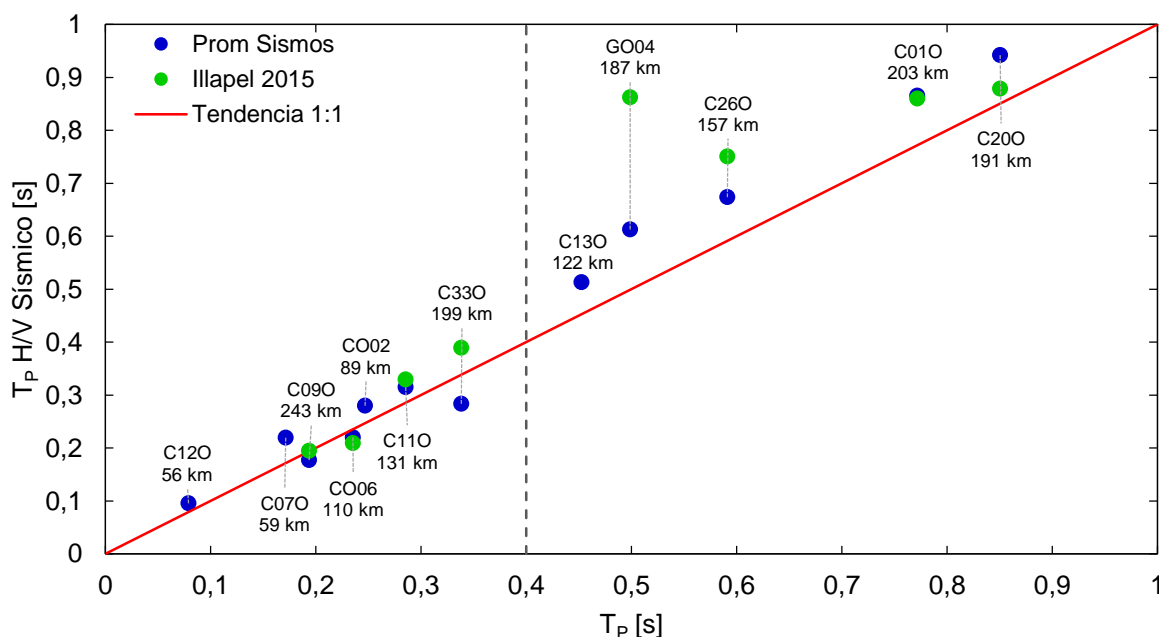


Figura 31 – Distribución del periodo de vibración sísmico en función del periodo predominante de vibraciones ambientales. Se incluyen distancias hipocentrales de cada estación al terremoto de Illapel 2015.

Del gráfico de la Figura 31 es posible observar un cambio de comportamiento en torno al periodo 0,4 s, puesto que las localidades con periodos predominantes menores tienen una variación pequeña del periodo calculado a partir de sismos y terremotos con respecto al periodo de vibraciones ambientales. En cambio, las estaciones con periodos de vibraciones ambientales mayores a 0,4 s muestran un aumento del periodo del peak de registros sísmicos, lo que puede estar asociado a una degradación de rigidez. La estación C01O (Las Compañías, La Serena) presenta una excepción al comportamiento exhibido por los datos, puesto que en la Figura se muestra el periodo asociado al segundo peak de mayor amplitud de la curva HVSr del terremoto de Illapel (Figura 14), situación que se debe a que este periodo es consistente con los resultados tanto de vibraciones ambientales como del promedio de eventos sísmicos. En caso de considerar el periodo de mayor amplitud efectivo entonces se manifestaría un aumento de la rigidez al aumentar la sollicitación sísmica.

Notar que las distancias hipocentrales de las estaciones son variadas y no representan una tendencia ni alteran necesariamente el comportamiento de los periodos.

5.3 Comparación entre Razones Espectrales H/V y Espectros de Respuesta

Respecto a las curvas HVSR, es posible observar en la Figura 14 que la técnica aplicada a vibraciones ambientales y eventos sísmicos es consistente y comparable. El único caso en el que ambas curvas no son coincidentes es la estación de Punitaqui (C05O), lo que no representa una anomalía necesariamente, puesto que la estación cuenta solo con dos registros sísmicos.

Así, el HVSR de vibraciones ambientales sigue a las curvas sísmicas tanto en forma como en amplitud en la mayoría de los casos, igualmente en frecuencias altas como frecuencias bajas. Ahora bien, para periodos bajos las curvas sísmicas tienden a ser más ruidosas, lo que tiene sentido en cuanto los terremotos poseen un contenido de frecuencias de rangos más amplios y especialmente en las altas frecuencias. El caso excepcional a esta tendencia es la estación ubicada en el Observatorio Cerro Tololo (GO04), la cual presenta diferencias notorias para periodos menores a 0,3 s, donde las vibraciones ambientales tienen una componente horizontal mayor que la vertical en comparación a los sismos.

En segundo lugar, respecto a los espectros de respuesta de la Figura 20, se puede encontrar dos tipos de comportamientos generales. El primero es de sitios que presentan curvas iguales para el terremoto y el promedio. El segundo dice relación con aquellas estaciones que manifiestan discordancia entre el promedio y el terremoto, ya sea por un desplazamiento de la curva, por la aparición de un peak distinto o bien por el aumento de amplitudes espectrales. Este comportamiento estaría directamente relacionado con la magnitud del evento y sollicitaciones de grandes deformaciones, que permiten la aparición en superficie de ondas amplificadas con otro rango de frecuencias predominantes. Las estaciones caracterizadas en alguna de sus componentes por esta situación son: Las Compañías (C01O, en las tres componentes), Monte Patria (C11O, componentes EW y Z), Las Tacas (C19O, componentes NS y Z), Hospital de Coquimbo (C20O, en las tres componentes), U.C.N. campus Guayacán (C22O, componente NS), Tongoy (C26O, componente EW), Estadio La Portada (C33O, componentes EW y NS) y Observatorio Cerro Tololo (GO04, componente NS).

Cuando se compara el periodo predominante obtenido mediante razones espectrales H/V y espectros de aceleración (Figura 32) se encuentra que los promedios son consistentes en el caso de las estaciones C07O, C09O, C12O, C19O, C22O, C33O, CO02, CO03 y GO04. La característica común a ellas es que el suelo tiene periodo predominante menor a 0,4 s o la curva HVSR es plana (Tabla 16), salvo para la estación GO04. Por otra parte, las estaciones clasificadas como rígidas y que no muestran consistencia en el periodo predominante son las estaciones C11O, C13O y CO06.

También es posible observar una inconsistencia en el peak de mayor amplitud de los espectros de respuesta para las componentes horizontales en la estación C01O, respecto al método de H/V (Figura 32). De hecho, el peak predominante de HVSR no se observa en el espectro, excepto para algunos sismos (incluyendo el terremoto) en la componente NS (Figura 20). Los espectros promedio para la estación C33O sí son consistentes con el peak predominante en el HVSR, al menos con las curvas derivadas de eventos sísmicos. Cabe destacar que los espectros de las estaciones C01O y C33O son parecidos en forma, amplitudes y periodos de los peak, para componentes verticales y horizontales.

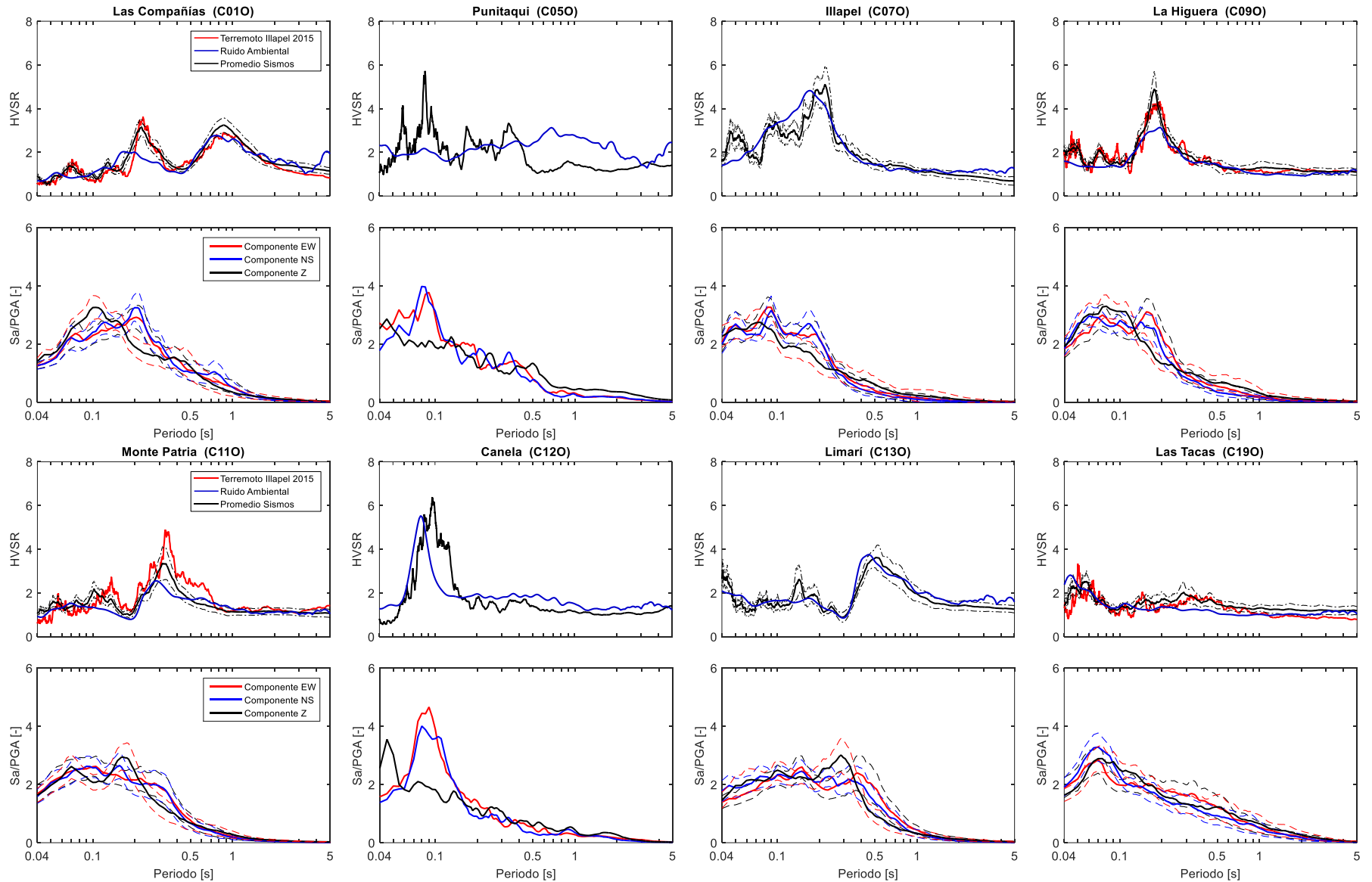


Figura 32 – Comparación entre resultados principales de razones espectrales H/V y curvas promedio de espectros de respuesta por estación sismológica.

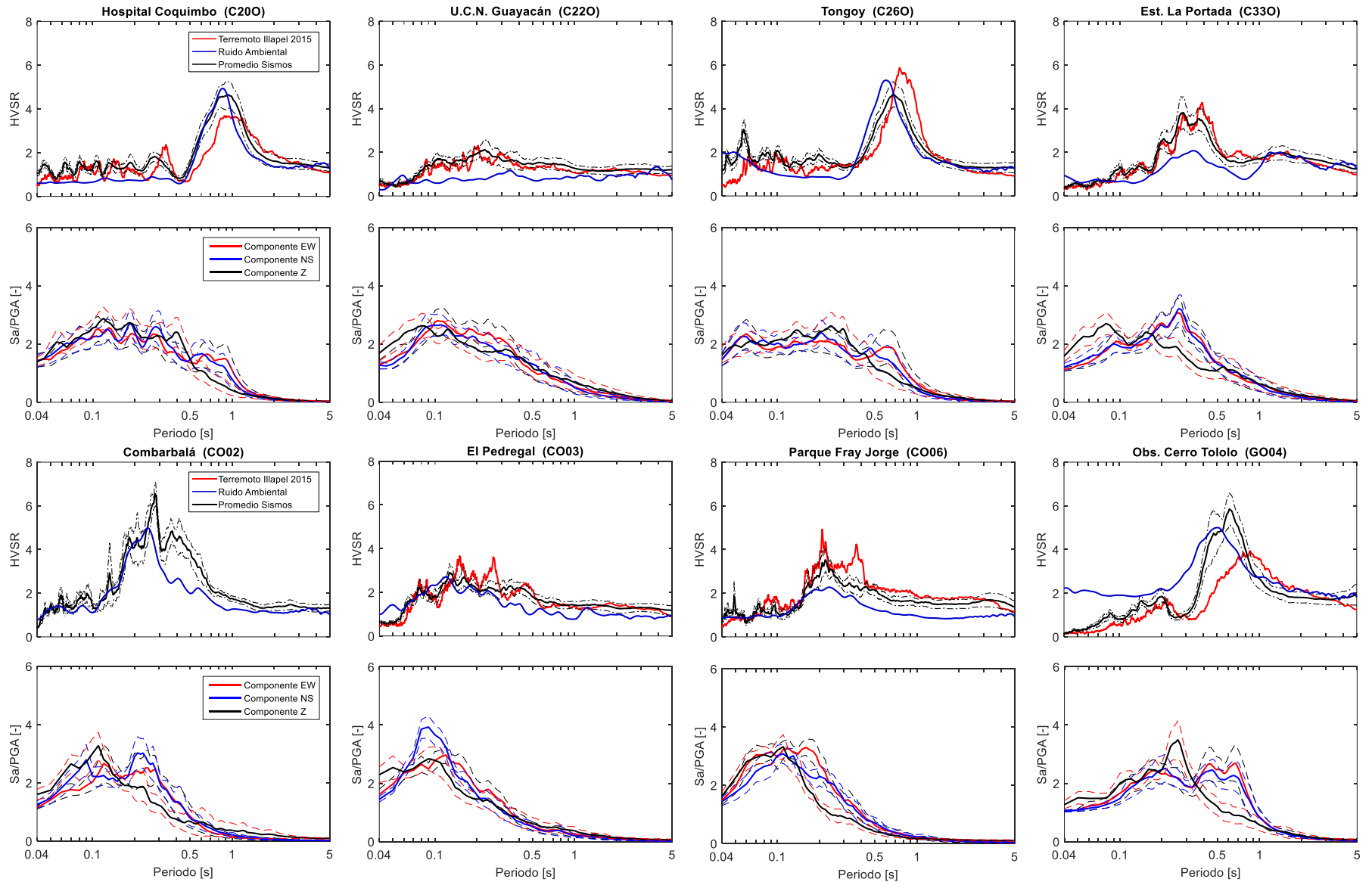


Figura 32 (continuación) – Comparación entre resultados principales de razones espectrales H/V y curvas promedio de espectros de respuesta por estación sísmológica.

5.4 Comparación Intensidades MSK entre Terremotos

En cuanto a los resultados de las intensidades MSK mostrados en las Figura 29 y Figura 30 es posible decir que los terremotos de Punitaqui 1997 e Illapel 2015 tienen impactos completamente distintos. A pesar de la mayor magnitud del terremoto de Illapel 2015, el nivel de intensidades evidenciado es bastante menor en la mayoría de las localidades de la Región respecto a Punitaqui 1997, salvo por Canela, Monte Patria, Salmana, Illapel y La Serena el resto disminuye su valor MSK. Esta situación puede ser explicada por varios factores dentro de los cuales se tiene: (1) la distancia hipocentral, (2) eventuales efectos de sitio, (3) mejora tecnológica de los materiales y métodos constructivos de viviendas, (4) mejoras en los parámetros y normas de diseño, (5) sismogénesis, tipo de falla y mecanismo focal de los eventos involucrados.

En ese sentido, incluir en el análisis al terremoto de Illapel 1943 podría dilucidar la respuesta de los suelos en las diferentes localidades, dado que comparte condiciones muy similares con el más reciente en cuanto a magnitud, área y localización de la ruptura, e incluso la generación de tsunamis con alturas de olas similares tanto en la bahía de Coquimbo como en la costa japonesa. De acuerdo con Piñones (2002), la máxima intensidad percibida por las estructuras de la época corresponde a grado VIII, en la ciudad de Ovalle, lo que concuerda con los valores obtenidos en el último terremoto. Pese a lo anterior, no es posible contrastar resultados de daños con mayor detalle por la falta de información necesaria para la estimación de intensidades MSK para Illapel 1943. Además, tanto la distribución de la población y por ende sus viviendas, como la disminución de la construcción en adobe y las modificaciones normativas implicarían una comparación disímil entre intensidades para ambos eventos.

Por otra parte, el epicentro de ambos eventos, Punitaqui 1997 e Illapel 2015, es compatible con la distribución de daños. Se puede apreciar que existe una rápida merma de las intensidades hacia el norte de las comunas de La Serena y Vicuña, las cuales alcanzan como máximo V-VI grados MSK en ciertos sectores para ambos sismos, mientras que la comuna de La Higuera no registra daños.

Por último, se debe tener en consideración que la evaluación de intensidades se realiza con adobe, material que clásicamente es más susceptible a eventos sísmicos de magnitud mayor, y que en particular se vuelve aún más vulnerable si se considera que las viviendas de dicho material poseen periodos predominantes de vibración similares a los que se encontraron en los suelos de la Región. Sin embargo, es esperable que los valores medidos se encuentren alterados producto de que la construcción en adobe es obsoleta. Así, aquellas viviendas existentes al 2015 han sido sometidas a varios eventos sísmicos previos y probablemente reparadas y reforzadas en reiteradas ocasiones, modificando su comportamiento estructural original. Aun así, de acuerdo con el Censo de 2012, el adobe tiene una presencia regional del orden del 12% en la totalidad de viviendas y se encuentra relativamente bien distribuido en la zona, por lo que los resultados son representativos en este material.

5.5 Determinación de Efectos de Sitio

A continuación, se describen en detalle algunas de las localidades (ciudades) que evidencian posibles efectos de sitio, o bien que son de importancia demográfica.

5.5.1 Ciudad de La Serena

La ciudad de La Serena es la capital regional y cuenta con la mayor cantidad de habitantes y estaciones sismológicas de la Región, con 5 estaciones actualmente activas pertenecientes a la RSN y RNA. El resumen de toda la información disponible para tal efecto se tiene en las Figura 33 y Figura 34.

En primer lugar, de acuerdo con Moscoso et al. (1982), la geología de la ciudad es altamente compleja, dominada por dos fenómenos principales: la desembocadura del Río Elqui y la Bahía de Coquimbo. Así, la base la conforma el Grupo Bandurrias (Kb), rocas volcánicas, andesíticas con intercalaciones sedimentarias, clásticas y calcáreas. Luego, se posiciona la Formación Coquimbo (Tec) que corresponde a sedimentos marinos aterrazados: areniscas, calcarenitas, coquinas y conglomerados, incluyen cubierta cuaternaria de poco espesor. En la zona de la desembocadura, la Formación Coquimbo se encuentra interrumpida por Gravas de Atacama (Tega) conformadas por gravas y conglomerados poco consolidados, incluyendo depósitos aterrazados del río Elqui. Finalmente, sobre todo lo anterior se presentan depósitos aluviales modernos (Qal) en el cauce del río que disputan presencia con depósitos eólicos modernos en el borde costero.

La geología superficial es consistente en su totalidad con los resultados de las razones espectrales H/V. La estación C01O se encuentra emplazada sobre sedimentos aterrazados lo que podría explicar la manifestación de 2 peaks, además se tiene que el sector de Las Compañías se localiza topográficamente en una terraza alta de La Serena. Por otra parte, la estación C16O exhibe un peak muy marcado en 0,8 s que responde a un depósito de suelo relativamente no consolidado como podría generarse por deposición eólica. La estación C33O se sitúa en una zona compleja en cuanto se encuentran al menos tres unidades geológicas, lo que podría traer como consecuencia la inconsistencia de la amplitud del peak mayor alcanzado por el análisis de vibraciones ambientales y los eventos sísmicos. La estación CO05 se encuentra ubicada en dependencias del Observatorio Cerro Tololo, particularmente en un cerro en La Serena (ver Figura 41 en ANEXO B), lo que es consistente con una curva de HVSR para vibración ambiental plana, con amplitudes menores a 2. La última estación es C04O, la cual tiene dos peaks en su curva H/V que podrían estar relacionados con dos estratos, uno muy rígido (0,1 s) y el otro blando (1,2 s). Esta situación no es tan directa de evaluar solo con la geología de la Figura 33, sin embargo, la Figura 34 muestra un perfil de sondaje hasta los 30 m.

En relación con la degradación de rigidez, no se observa tal comportamiento en las estaciones que C01O y C33O, aunque es esperable que tanto la estación C04O como la C16O pudieran presentar tal efecto en cuanto se encuentran emplazadas sobre depósitos blandos a muy blandos, respectivamente. Además, la estación ubicada en Caleta San Pedro (C16O) podría, eventualmente, evidenciar licuefacción dada la composición de suelo arenoso con deposición eólica, es decir con bajo nivel de compactación, y un nivel freático cercano a la superficie por condición natural del borde costero.

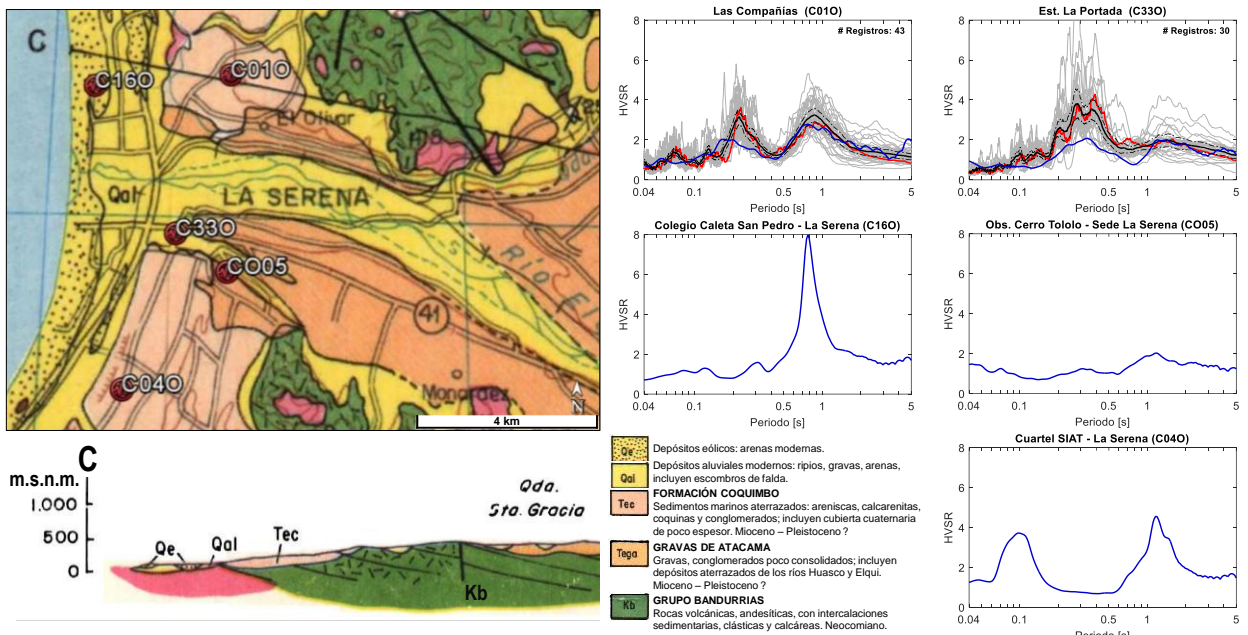


Figura 33 – Información relevante para la caracterización sísmica de los suelos de la ciudad de La Serena. Geología modificada de Moscoso et al. (1982).

Las estaciones C010 y C330 cuentan con mayor cantidad de información que sus pares, lo que permite mayor nivel de análisis. Moscoso et al. (1982) caracterizan un perfil transversal que atraviesa la zona de Las Compañías, por lo tanto se lo puede usar para verificar la coherencia del perfil Vs generado en la sección 3.6.2 (Figura 34). En el perfil geológico se aprecia que el espesor aproximado de la Formación Coquimbo en la zona es de 150 a 200 m, luego de lo cual se encuentra el contacto con la roca (Kb), configuración que valida la zona profunda del perfil de velocidad para la estación C010.

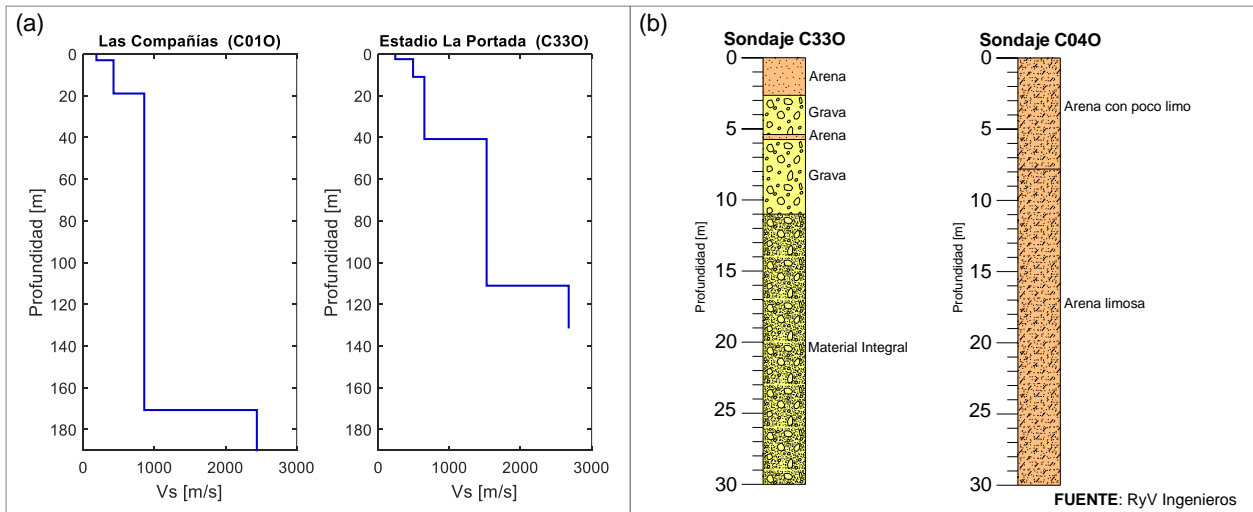


Figura 34 – Perfiles en profundidad de (a) velocidad de onda de corte (sección 3.6.2) y (b) de suelo para algunas estaciones de La Serena (sondajes gentileza de RyV Ingenieros Asociados).

El perfil de la estación C330 fue confeccionado imponiendo la profundidad de contacto de las 3 primeras capas, con base en un sondaje de 30 m, disponible por gentileza de Ruz y Vukasovic Ingenieros Asociados (Figura 34), además de asociar parámetros de búsqueda en rango acotados a los materiales caracterizados.

Sin embargo, para que fuere consistente con las razones espectrales y la curva de dispersión se debió incluir 2 capas extra por debajo del material integral, ambas con velocidades de roca, lo que no se condice con la geología necesariamente, a pesar de que la zona presenta coexistencia de múltiples condiciones.

Finalmente, el análisis de intensidades MSK no aporta información a esta ciudad, dado que el nivel de daños registrados para todos los terremotos es bajo. Lo anterior puede deberse, probablemente, a que el polo demográfico de la Región posee un grado de tecnología de diseño y construcción más alto que el resto de las localidades, particularmente para viviendas de tipo A y B.

5.5.2 Ciudad de Coquimbo

La ciudad de Coquimbo (notar distinción con la comuna de Coquimbo mencionada igualmente en el documento) posee dos estaciones instaladas cerca del centro urbano histórico, emplazadas geográficamente en una península de forma triangular que, de acuerdo a la geología de la Carta Geológica N° 55 (Moscoso et al., 1982), corresponde a un afloramiento rocoso de granito jurásico (JKg) en el borde cercano al mar, al que siguen hacia el interior sedimentos marinos aterrazados de la Formación Coquimbo (Tec) que en ciertos sectores son cubiertos por depósitos modernos tanto eólicos (Qe) como aluviales de ripio, gravas y arenas (Qal). Esta condición se observa en la Figura 35.

La descripción geológica anterior es consistente con lo observado en los gráficos de razones espectrales H/V de la Figura 35, donde la Estación C200 se ubica sobre los depósitos sedimentarios, constatados por el marcado peak cercano a los 1 s de periodo, mientras que la Estación C220, ubicada sobre roca jurásica, responde con amplitudes menores a 2. Esta condición indica un efecto de sitio para el depósito bajo el Hospital de Coquimbo.

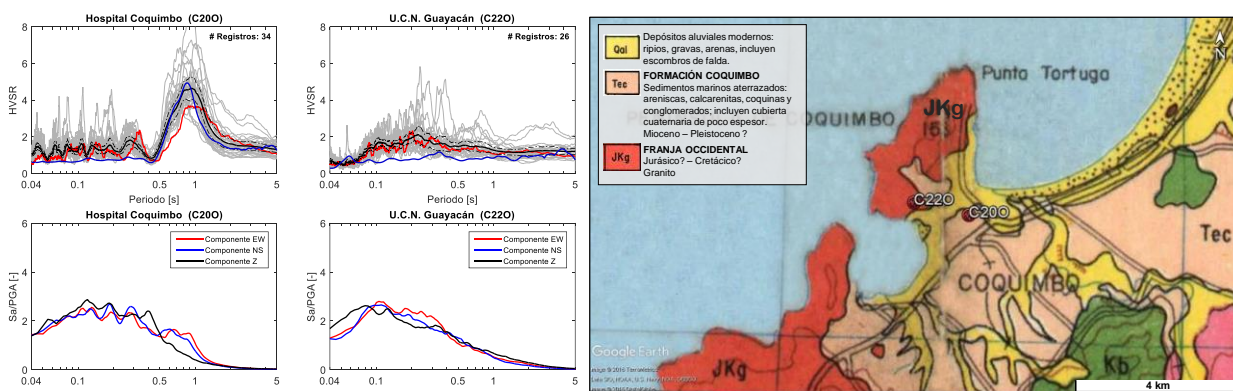


Figura 35 – Información relevante para la caracterización sísmica de los suelo de la ciudad de Coquimbo. Geología modificada de Moscoso et al. (1982).

Por otra parte, ambas estaciones se encuentran en el mismo centro poblacional, lo que dificulta una distinción en los resultados de intensidades MSK entre ambos sitios, en consecuencia no se logra generar una comparación de los daños en roca o suelo. De todas formas, la ciudad de Coquimbo evidenció un mayor nivel de daños producto del tsunami en el borde costero que por efecto directo del terremoto (GEER, 2015).

5.5.3 Ciudades de Monte Patria y Pedregal

El PGA más alto registrado durante el Terremoto de Illapel 2015 se obtuvo en la Estación C110, Monte Patria, donde las componentes horizontales alcanzaron aceleraciones de 0,83g y 0,71g, EW y NS, respectivamente, mientras que la vertical alcanzó 0,48g. A menos de 30 km de distancia se encuentra la Estación CO03, Pedregal, donde las aceleraciones registradas no alcanzan ni la mitad de las anteriores. Asimismo, los registros de aceleraciones mostrados en la Figura 36 dan cuenta de que el comportamiento global del sismo posee aceleraciones de amplitud menor.

Esta situación es la que conlleva especial atención a Monte Patria, puesto que podría existir un efecto de sitio importante en la zona.

Así, comparando la geología de ambos lugares, se establece que, tanto Monte Patria como Pedregal, se sitúan sobre depósitos aluviales cuaternarios que a su vez se encuentran sobre la Formación Viñita (Kv) compuesta por rocas volcánicas andesíticas, tobas ignimbríticas traquíticas y riolíticas y conglomerados y areniscas volcánicas, en parte con huesos de dinosaurios. En el caso particular de Pedregal también se manifiesta clara presencia de rocas graníticas cretácicas y/o terciarias (KTg), generalmente en la ribera sur del río Grande (Thomas, 1967).

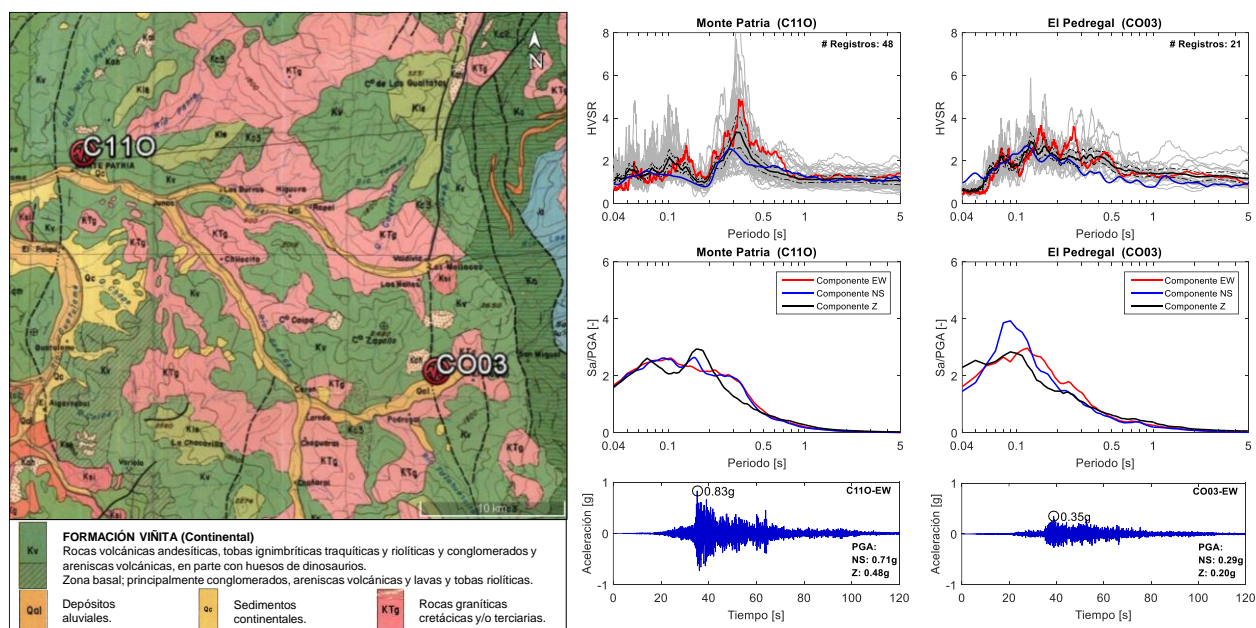


Figura 36 – Información relevante para la determinación de efectos de sitio en Monte Patria, comparándola con la localidad de Pedregal. Geología modificada de Thomas (1967).

Por otra parte, cuando se analizan las razones espectrales H/V obtenidas para ambas estaciones (Figura 36), se observa que Monte Patria presenta un peak de 0,3 s aproximadamente lo que responde a un depósito de suelo mientras que Pedregal manifiesta una banda ancha de amplificaciones pero con valores levemente superiores a 2. La diferencia no es explicable directamente con la geología del lugar, puesto que ambas se encuentran en un contexto de similares condiciones.

Al evaluar las intensidades MSK de los sismos estudiados, de acuerdo a los periódicos de la época, Monte Patria fue casi completamente destruido por el terremoto de Illapel 1943 (Piñones, 2002), mientras que no se encontraron referencias de daños en Pedregal. Luego, en 1997 las intensidades registradas son idénticas para ambas localidades (Tabla 16) e iguales a VI-VII; sin embargo, estos valores podrían explicarse por la proximidad al epicentro del evento, que son consistentes con las zonas contiguas (ver Figura 29). Finalmente, surge una notoria diferencia en las intensidades estimadas para Illapel 2015, donde Monte Patria alcanza VI-VII y Pedregal V-VI. Luego, el nivel de daños alcanzados en Monte Patria parece permanecer relativamente constante independiente de la fuente, lo que motiva un análisis de otra variable, la topografía.

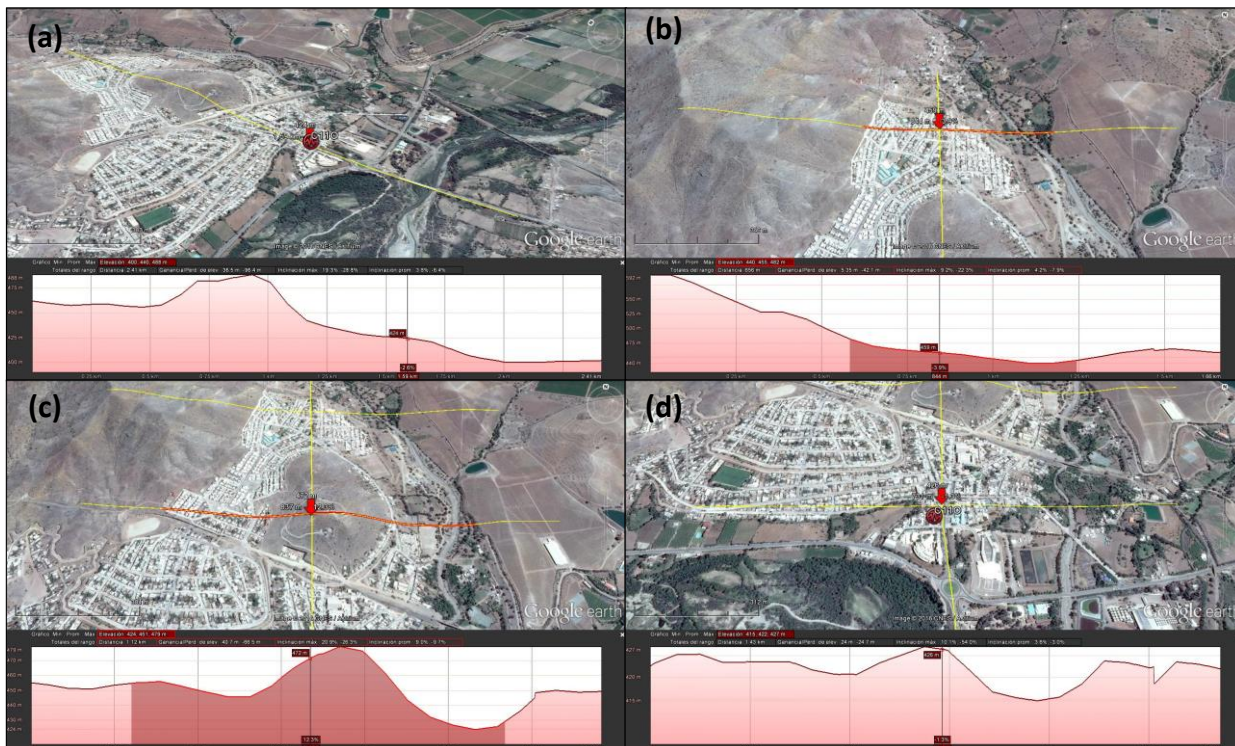


Figura 37 – Perfiles de elevación en distintos sitios de la ciudad de Monte Patria, generados con Google Earth®. (a) Perfil NS atravesando la ciudad con la estación C110 en él, mientras que (b), (c) y (d) son perfiles EW en la sección norte, centro y sur de la ciudad, respectivamente.

De acuerdo a la información satelital de Google Earth® es posible obtener perfiles de elevación de la ciudad. En particular, en la Figura 37 se muestran 4 perfiles, uno en orientación norte-sur mientras que los otros tres son este-oeste. En ellos se puede notar la presencia de un cerro en mitad de la ciudad de 64 m de altura respecto al nivel de la estación sismológica y aproximadamente 600 m de longitud en su base en dirección norte-sur, además de cubrir aproximadamente el 10% de la superficie de la ciudad. La composición del mismo es desconocida en cuanto la geología no permite asegurar que sea un afloramiento rocoso. Así, la presencia del accidente geográfico puede ser un causante de amplificación de la respuesta sísmica asociado a topografía.

5.5.4 Ciudad de Illapel

Illapel se encuentra muy cerca del epicentro del terremoto de 2015, y por ende se espera que la cantidad de daños y su respectiva intensidad sean altas. Sin embargo, la

intensidad registrada para el terremoto de Punitaqui 1997 es idéntica, en un sismo de distancia hipocentral mayor, de menor magnitud y sismogénicamente distinto, lo que no es suficiente para explicar tales resultados.

Otro antecedente para Illapel es que el periodo predominante bordea los 0,2 s, lo que lo califica como rígido y de tipo II (Idini et al., 2016), e incluso con consistencia entre las razones espectrales H/V de vibraciones ambientales y eventos sísmicos. Sin embargo, la amplitud del peak es aproximadamente 5, uno de los mayores de la Región.

El espectro de respuesta muestra dos peaks, uno en 0,2 s y el otro, de mayor amplitud, cercano a 0,1 s, nuevamente indicando consistencia con lo observado en HVSR. Lamentablemente, esta estación no se encontraba registrando cuando ocurrió el evento principal de 2015, por lo tanto no se conocen las aceleraciones alcanzadas; sin embargo, sí cuenta con registros de réplicas incluidos en la Figura 38. Además, existía una estación en otro sitio de la ciudad que logró marcar una aceleración PGA de 0,35g en la componente N70°E durante el terremoto de Punitaqui 1997 (Pardo et al., 2002). Esta estación (ILLA) pertenece a RENADIC y en la Figura 38 se muestran curvas HVSR a partir de 5 eventos registrados en ella, dentro de los cuales cuenta con los terremotos de Valparaíso 1985 y Punitaqui 1997, que son consistentes con los obtenidos en C070.

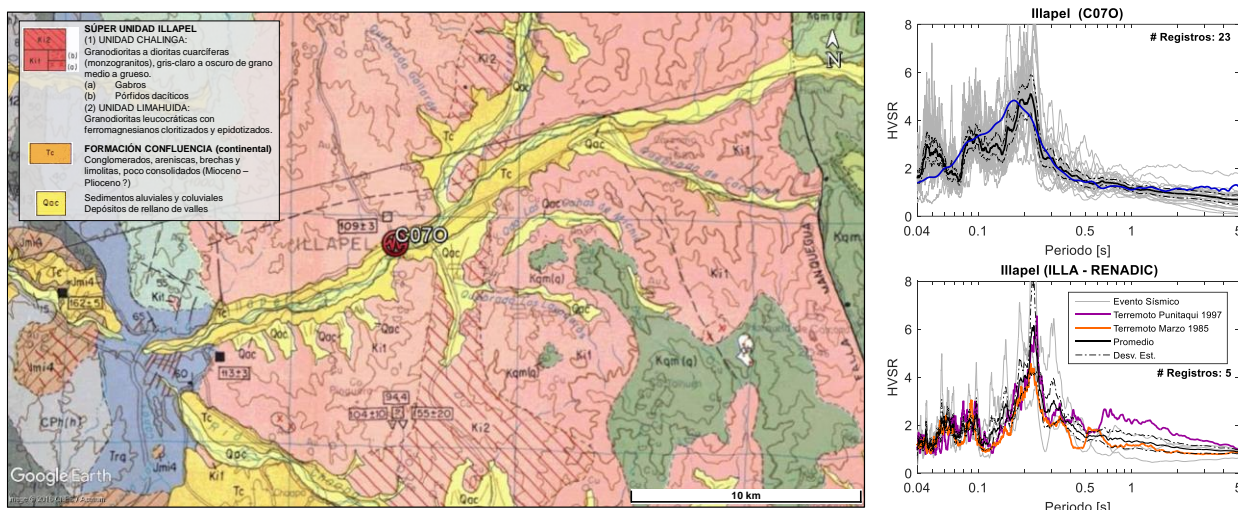


Figura 38 – Información relevante para la caracterización sísmica de los suelo de la ciudad de Illapel. Geología modificada de Rivano y Sepúlveda (1991).

Por otra parte, en cuanto a la geología de la zona, se evidencia una situación similar al resto de ciudades en valles aluviales. La Figura 38 muestra que Illapel se emplaza sobre una secuencia de sedimentos aluviales y coluviales cuaternarios (Qac) en conjunto con la Formación Confluencia (Tc), conformada por una mezcla de conglomerados, areniscas, brechas y limolitas terciarios, en general poco consolidados. Este angosto valle está rodeado por cerros, partes de la Unidad Chalinga (Ki1) perteneciente a la Súper Unidad Illapel, la que se presenta como granodioritas a dioritas cuarcíferas de grano medio a grueso (Rivano y Sepúlveda, 1991).

Así, toda la información es consistente si se considera que las altas intensidades (relativas a los resultados obtenidos) se explican en que las viviendas evaluadas (adobe) tienen periodos predominantes de rango similar al suelo de Illapel, lo que a su vez implica una alta susceptibilidad a las amplificaciones sísmicas evidenciadas en dicho rango.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Respecto del trabajo y su desarrollo general, se pueden establecer las siguientes conclusiones.

- Las razones espectrales calculadas a partir de sismos y de vibraciones ambientales son consistentes aun cuando se aprecia una degradación de rigidez producto de la magnitud del evento sísmico, mostrando el peak del terremoto un periodo más alto respecto al promedio de las curvas para las estaciones con periodo predominante mayor a 0,4 s (Figura 31). Por otra parte, los espectros de respuesta evidencian resultados dispares con las razones espectrales, pues sus máximos no corresponden a los periodos predominantes del suelo, especialmente en suelos blandos.
- La información geológica (Tabla 1) es consistente con las HVSR (Figura 14), lo que se resumió en la Tabla 16, encontrándose que gran parte de las estaciones se encuentra sobre depósitos de suelo rígidos o afloramientos rocosos. Los resultados muestran que los periodos predominantes de vibración de los suelos de la mayoría de las estaciones son menores a 0.4 s, lo que concuerda con que el material más dañado durante el terremoto fuera el adobe, aun cuando su participación en la totalidad de viviendas en la Región no supera el 12%, aproximadamente.
- Los terremotos de Illapel 1943 e Illapel 2015 son similares no solo en el aspecto sismológico, sino que además desarrollaron tsunamis comparables e impactaron a la infraestructura civil con niveles de daños similares y menores a los evidenciados en Punitaqui 1997, aunque los escasos datos del terremoto de 1943 no permiten una conclusión definitiva.
- Los daños catastrados para el terremoto de Illapel 2015 son menores a los reportados para el terremoto de Punitaqui 1997, lo que es consistente con el mecanismo de falla y localización de este último. Sin embargo, este hecho podría deberse a otros factores como la mejora tecnológica de los materiales y construcción, además de las normativas de diseño. Las intensidades MSK estimadas para el adobe también arrojaron valores menores para Illapel 2015, lo que da cuenta de que efectivamente Punitaqui 1997 es un evento más destructivo, a pesar de la menor magnitud.
- La técnica de razones espectrales H/V, generadas a partir de los registros de eventos sísmicos en estaciones sismológicas, funciona adecuadamente en los suelos de la Región de Coquimbo, permitiendo aproximaciones del periodo predominante sin necesidad de realizar mediciones de vibraciones ambientales en terreno. Así, se suman antecedentes a la propuesta de Lermo y Chávez-García (1993) en México.
- El adobe no es necesariamente un material apropiado para determinar la existencia del efecto de sitio en aquellas localidades con periodos predominantes bajos (suelos rígidos) puesto que el daño exhibido puede ser alto producto de su propio periodo de vibración natural. Luego, si se comparan dos sitios cualesquiera con características

sísmicas similares no es posible discriminar la presencia de amplificación por topografía al evaluar solo las intensidades MSK y los periodos predominantes.

- Se encontraron efectos de sitio en Monte Patria, ciudad que sostenidamente muestra un alto nivel de daños o intensidades independiente del terremoto considerado. Esto se basa en la comparación con la localidad de Pedregal, sitio relativamente cercano (30 km aprox.) con geología y propiedades sísmicas similares pero con contenido de aceleraciones y energético distinto en el registro del terremoto de Illapel 2015, además de intensidad MSK inferior en I grado para el mismo evento. El efecto de sitio podría ser atribuible a la topografía del sector, aunque no se descarta otro factor.
- Algunos sectores de las ciudades de La Serena y Coquimbo podrían presentar efectos de sitio, lo que no es posible descifrar cuando el daño evidenciado se mide incluyendo amplias zonas para tal efecto.

6.2 Recomendaciones

- Los métodos de ondas superficiales evidenciaron limitaciones en los suelos de la Región de Coquimbo. Se recomienda mejorar estas técnicas para la generación de perfiles de velocidad de ondas de corte Vs con mayor nivel de detalles.
- Dada la baja presencia relativa de viviendas de adobe en la Región, se recomienda fuertemente generar homologaciones de las curvas patrón en las intensidades MSK para albañilería y hormigón armado, en cuanto catastrar daños en forma apropiada es costoso y las instituciones gubernamentales seguirán aplicando su tipificación ante emergencias sísmicas.

CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre, L., & Egert, E. (1965). Geología del Cuadrángulo Quebrada Marquesa. *Carta Geológica N° 15, Escala 1:50.000*. Región de Coquimbo: Instituto de Investigaciones Geológicas de Chile.
- Aguirre, L., & Egert, E. (1970). Geología del Cuadrángulo Lambert (La Serena). *Carta Geológica N° 23, Escala 1:50.000*. Región de Coquimbo: Instituto de Investigaciones Geológicas de Chile.
- Astroza, M., & Monge, J. (1989). Metodología para determinar el grado de Intensidad a partir de los daños. *5as Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica*.
- Astroza, M., Omerovic, J., Astroza, R., Music, J., Saragoni, R., Álvarez, I., . . . Rabello, O. (2008). *Intensity and Damage Assessment of the 2007 Tocopilla Earthquake, Chile*. Obtenido de Earthquake Engineering and Research Institute: https://www.eeri.org/site/images/lfe/pdf/chile_20071114.pdf
- Astroza, M., Ruiz, S., & Astroza, R. (2012). Damage Assessment and Seismic Intensity Analysis of the 2010 (Mw 8.8) Maule Earthquake. *Earthquake Spectra*, 28(S1), S145-S164.
- Barbat, A. H., Pujades, L. G., & Lantada, N. (2008). Seismic Damage Evaluation in Urban Areas using the Capacity Spectrum Method: Application to Barcelona. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*(28), 851-865.
- Becerra, A. (2014). *Seismic Microzoning of Arica and Iquique, Chile*. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería, Santiago de Chile.
- Beck, S., Barrientos, S., Kausel, E., & Reyes, M. (1998). Source Characteristics of Historic Earthquakes along the Central Chile Subduction Zone. *Journal of South American Earth Sciences*, 11(2), 115-129.
- Börgel, R. (1983). *Geografía de Chile, Tomo II, Geomorfología*. Santiago: Instituto Geográfico Militar.
- Campos, J., Hatzfeld, D., Madariaga, R., López, G., Kausel, E., Zollo, A., . . . Lyon-Caen, H. (2002). A seismological study of the 1835 seismic gap in south-central Chile. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 132(1), 177-195.
- Candia, G., de Pascale, G., Montalva, G., & Ledezma, C. (2017). Geotechnical Aspects of the 2015 Mw 8.3 Illapel Megathrust Earthquake Sequence in Chile. *Earthquake Spectra*. doi:10.1193/031716EQS043M
- Chopra, A. K. (2011). *Dynamics of Structures* (Fourth ed.). Prentice-Hall International.
- Cordero, F. (2011). *Modelación de la Falla de Compresión en Muros de Hormigón Armado observada en el Terremoto de Magnitud Mw 8.8 de Chile del 2010*. Memoria para

optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil.

- de la Llera, J., Rivera, F., Mitrani-Reiser, J., Jünemann, R., Fortuño, C., Ríos, M., . . . Cienfuegos, R. (2016). Data Collection after the 2010 Maule Earthquake in Chile. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15(2), 555-588.
- DeMets, C., Gordon, R., & Argus, D. (2010). Geologically current plate motions. *Geophysical Journal International*, 181(1), 1-80.
- Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile. (2012). *Mw=8.8 Terremoto en Chile, 27 de febrero de 2010*. Santiago.
- Díaz, O. (2001). *Estudio de los Efectos de las Condiciones Locales en el Terremoto de Punitaqui de 1997*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil.
- García, J. (1999). *Hidrogeología del sector de Salamanca, Provincia de Choapa, IV región*. Memoria para optar al Título de Geólogo, Universidad de Chile, Departamento de Geología.
- Geli, L., Bard, P.-Y., & Jullien, B. (1988). The Effect of Topography on Earthquake Ground Motion: A Review and New Results. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78(1), 42-63.
- Geotechnical Extreme Events Reconnaissance (GEER) Association. (2015). *Geotechnical Reconnaissance of the 2015 Mw 8.3 Illapel, Chile Earthquake*.
- González, D. (2017). *Generación de Espectros de Respuesta con Sismos Chilenos para Suelos en función de su Periodo Fundamental y Nivel de Amplificación*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, Santiago.
- Greve, F. (1946). *Descripción de los principales efectos y ubicación del epicentro de los sismos destructores sentidos en Chile en los años 1942-43-44-45 y 46*. Universidad de Chile, Instituto Sismológico, Santiago.
- Hatori, T. (1968). Study on Distant Tsunamis along the Coast of Japan. Part 2, Tsunamis of South America Origin. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 46(15), 345-359.
- Heidarzadeh, M., & Murotani, S. S. (2016). Source Model of the 16 September 2015 Illapel, Chile, Mw 8.4 Earthquake based on Teleseismic and Tsunami Data. *Geophysical Research Letters*(43), 643-650.
- Idini, B., Rojas, F., Ruiz, S., & Pastén, C. (2016). Ground Motion Prediction Equations for the Chilean Subduction Zone. *Bulletin of Earthquake Engineering*. doi:10.1007/s10518-016-0050-1

- Instituto Nacional de Estadísticas (INE). (1940). *Chile: XI Censo de Población (1940)*. Recuperado el 15 de marzo de 2017, de Sitio Web INE: Censos de Población y Vivienda:
http://www.ine.cl/canales/usuarios/cedoc_online/censos/pdf/censo_1940.pdf
- Instituto Nacional de Estadísticas (INE). (1992). *Chile: Censo de Población y Vivienda 1992*. Recuperado el 15 de marzo de 2017, de REDATAM INE:
<http://espino.ine.cl/cgi-bin/RpWebEngine.exe/PortalAction?&MODE=MAIN&BASE=CPCHL1992COM&MAIN=WebServerMain.inl>
- Instituto Nacional de Estadísticas (INE). (2002). *Chile: Censo de Población y Vivienda 2002*. Recuperado el 15 de marzo de 2017, de REDATAM INE:
<http://espino.ine.cl/cgi-bin/RpWebEngine.exe/PortalAction?&MODE=MAIN&BASE=CPCHL2KREG&MAIN=WebServerMain.inl>
- Instituto Nacional de Estadísticas (INE). (2014). *Auditoría Técnica a la Base de Datos del Levantamiento Censal Año 2012*. Obtenido de Sitio Web INE: Censos en Chile:
http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/censos_poblacion_vivienda/auditoria-levantamiento-censal.pdf
- Instituto Nacional de Estadísticas (INE). (2014). *País y Regiones Total: Actualización Población 2002-2012 y Proyecciones 2013-2020*. Recuperado el 15 de marzo de 2017, de Sitio Web INE: Demográficas y Vitales (Productos Estadísticos):
http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/familias/demograficas_vitales.php
- Instituto Nacional de Normalización (INN Chile). (2009). NCh 433 Of. 96, Mod. 2009. *Diseño Sísmico de Edificios*. Chile.
- Kappos, A. J., Panagopoulos, G., & Penelis, G. G. (2008). Development of a Seismic Damage and Loss Scenario for Contemporary and Historical Buildings in Thessaloniki, Greece. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28, 836-850.
- Kircher, C., Nassar, A., Kustu, O., & Holmes, W. (1997). Development of Buildings Damage Functions for Earthquakes Loss Estimation. *Earthquake Spectra*, 13(4), 663-682.
- Konno, K., & Ohmachi, T. (1998). Ground-Motion Characteristics Estimated from Spectral Ratio between Horizontal and Vertical Components of Microtremor. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(1), 228-241.
- Kramer, S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall.
- Krankel, A. D., Carver, D. L., & Williams, R. A. (2002). Nonlinear and Linear Site Response and Basin Effects in Seattle for the M 6.8 Nisqually, Washington, Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(6), 2090-2109.
- Lemoine, A., Madariaga, R., & Campos, J. (2001). Evidence for Earthquake Interaction in Central Chile: the July 1997-September 1998 Sequence. *Geophysical Research Letters*, 28(14), 2743-2746.

- Lermo, J., & Chávez-García, F. J. (1993). Site Effect Evaluation using Spectral Ratios with only One Station. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 83(No. 5), 1574-1594.
- Leyton, F., Ruiz, S., Sepúlveda, S., Contreras, J., Rebolledo, S., & Astroza, M. (2013). Microtremors' HVSR and its correlation with surface geology and damage observed after the 2010 Maule earthquake (Mw 8.8) at Talca and Curicó, Central Chile. *Engineering Geology*(161), 26-33.
- Martinelli, A., Cifani, G., Cialone, G., Corazza, L., Petracca, A., & Petrucci, G. (2008). Building Vulnerability Assessment and Damage Scenarios in Celano (Italy) using a Quick Survey Data-Based Methodology. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28, 875-889.
- Medvedev, S., Sponheur, W., & Karnik, V. (1964). Neue Seismische Skala. *Deutsche Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Heft*, Vol. 77.
- Menéndez, P. (1991). *Atenuación de las Intensidades del Sismo del 3 de marzo de 1985 en función de la Distancia a la Zona de Ruptura y del Tipo de Suelo*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2011). Decreto Supremo N° 61. *Aprueba Reglamento que Fija el Diseño Sísmico de Edificios y Deroga Decreto N° 117, de 2010*. Santiago, Chile. Recuperado el 15 de marzo de 2017, de <http://bcn.cl/1vbp6>
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2016). *Plan de Reconstrucción Región de Coquimbo 2015*. Recuperado el 15 de marzo de 2017, de Sitio Web MINVU: http://www.minvu.cl/opensite_20151002093225.aspx
- Morales, R. M., Olano, A. S., Cabrejos, R. T., & Morales, O. (1980). Estudio Sísmico de Construcciones de Adobe de Dos Pisos. *Anales III Congreso Nacional de Ingeniería Civil*.
- Moscoso D., R., Nasi Pardo, C., & Salinas Zurich, P. (1982). Geología de la Hoja Vallenar y parte Norte de La Serena. *Carta Geológica N° 55, Escala 1:250.000*. Regiones de Atacama y Coquimbo: Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Mpodosis, C., & Cornejo, P. (1988). Geología de la Hoja de Pisco Elqui. *Carta Geológica N° 68, Escala 1:250.000*. Región de Coquimbo: Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Nakamura, Y. (1989). A Method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute (RTRI)*, 1(30), 25-33.
- Nasi, C., Moscoso, R., & Makshev, V. (1990). Geología de la Hoja de Guanta. *Carta Geológica N° 67, Escala 1:250.000*. Regiones de Atacama y Coquimbo: Servicio Nacional de Geología y Minería.

- Pacific Northwest Seismic Network. (07 de marzo de 2017). *Outreach Overview: Earthquake Hazards - Site Effects*. Obtenido de PNSN Web Site: <https://www.pnsn.org/outreach/earthquakehazards/site-effects>
- Pardo, M., Comte, D., Monfret, T., Boroschek, R., & Astroza, M. (2002). The October 15, 1997 Punitaqui Earthquake (Mw=7.1): a destructive event within the subducting Nazca plate in Central Chile. *Tectonophysics*(345), 199-210.
- Pastén, C. (2007). *Respuesta Sísmica de la Cuenca de Santiago*. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Ingeniería Geotécnica, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil.
- Pastén, C., Lezana, F., Leyton, F., & Ruiz, S. (2015). Razones Espectrales H/V de una Red Temporal de Estaciones Sismológicas en la Cuenca de Santiago - Resultados Preliminares. *XI Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica, Paper N° 39*. Santiago.
- Pasten, C., Sáez, M., Ruiz, S., Leyton, F., Salomón, J., & Poli, P. (2016). Deep Characterization of the Santiago Basin using HVSr and cross-correlation of ambient seismic noise. *Engineering Geology*(201), 57-66.
- Pinto, L. (2016). *Determinación de Efectos de Sitio en las Estaciones Sismológicas de la Región de Tarapacá*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil.
- Piñones, A. (2002). *Efectos del Sismo del 14 de octubre de 1997 en la Ciudad de Ovalle*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, Santiago.
- Rivano, S. (1980). Geología de los Cuadrángulos D-86, Las Ramadas, Carrizal y Paso Río Negro. *Cartas Geológicas N° 41 a 44, Escala 1:50.000*. Región de Coquimbo: Instituto de Investigaciones Geológicas de Chile.
- Rivano, S., & Sepúlveda, P. (1991). Geología de la Hoja de Illapel. *Carta Geológica N° 69, Escala 1:250.000*. Región de Coquimbo: Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Rosales, G. (1988). *Geología del Área de Combarbalá - San Lorenzo (31° 00' - 31° 15' Latitud Sur), Región de Coquimbo*. Memoria para optar al Título de Geólogo, Universidad de Chile, Departamento de Geología.
- Ruiz, S., Klein, E., del Campo, F., Rivera, E., Poli, P., Metois, M., . . . Fleitout, L. (2016). The Seismic Sequence of the 16 September 2015 Mw 8.3 Illapel, Chile, Earthquake. *Seismological Research Letters*, 87(4).
- Sáez, M. (2016). *Correlación Cruzada de Ruido Sísmico para la Obtención de Perfiles Profundos de Velocidad de Onda de Corte en la Cuenca de Santiago*. Tesis para optar al Grado de Máster en Ingeniería Sísmica, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, Santiago de Chile.

- Saragoni, R. (2011). El Mega Terremoto del Maule de 2010: Una lección de buena ingeniería, pero con sorpresas y nuevos desafíos. *Revista Anales, Séptima Serie*(N° 1).
- Thomas, H. (1967). Geología de la Hoja de Ovalle. *Boletín N°23*. Provincia de Coquimbo, Chile: Instituto de Investigaciones Geológicas de Chile.
- Tilmann, F., Zhang, Y., Moreno, M., Saul, J., Eckelmann, F., Palo, M., . . . Dahm, T. (2016). The 2015 Illapel Earthquake, Central Chile: A Type Case for a Characteristic Earthquake? *Geophysical Research Letters*, 43, 574-583. doi:10.1002/2015GL066963
- Udías, A., Madariaga, R., Buforn, E., Muñoz, D., & Ros, M. (2012). The large Chilean Historical Earthquakes of 1647, 1657, 1730 and 1751 from Contemporary Documents. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(4), 1639-1653.
- Valdebenito, G., Alvarado, D., Sandoval, C., & Aguilar, V. (2015). Terremoto de Iquique Mw=8.2 - 01 abril 2014: Daños Observados y Efectos de Sitio en Estructuras de Albalñería. *XI Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica ACHISINA 2015, Paper N° 221*. Santiago.
- Zanini, M., Hofer, L., Faleschini, F., Zampieri, P., Fabris, N., & Pellegrino, C. (2016). Evidences from the Preliminary Macroseismic Survey of the August 24, 2016 Amatrice Seismic Sequence (Central Italy). *Gruppo Nazionale per la Geofisica della Terra Solida: Sessione Amatrice*, (págs. 92-95).

ANEXOS

ANEXO A. BASE DE DATOS DE SISMOS CONSIDERADOS

A continuación se enlistan todos los eventos sísmicos empleados en el estudio, particularmente en la generación de curvas de razones espectrales H/V de la Figura 14 y espectros de respuesta de aceleraciones de la Figura 20.

Tabla 17 – Listado de Sismos considerados en el estudio de HVSR. Información sobre fecha, hipocentro, magnitud y cantidad de registros empleados.

N°	Fecha	Hora (UTC)	Latitud (°)	Longitud (°)	Prof. (km)	Mag.	# Reg.
1	29-10-2013	3:40:49	-30,705	-71,279	46,9	5,0	4
2	31-10-2013	23:03:58	-30,372	-71,501	52	6,5	12
3	04-04-2014	9:52:07	-31,476	-70,639	106,3	5,4	2
4	05-04-2014	2:22:39	-32,669	-71,295	42,3	5,7	1
5	30-04-2014	18:00:55	-32,723	-71,746	21,3	5,1	1
6	21-05-2014	9:00:53	-30,452	-71,311	36,2	5,6	8
7	12-06-2014	12:28:53	-30,745	-70,564	52,6	5,1	4
8	13-07-2014	7:18:24	-30,736	-70,665	86,3	5,7	8
9	23-08-2014	22:32:23	-32,737	-71,498	40,1	6,4	2
10	02-02-2015	10:49:49	-32,002	-67,529	147,8	6,4	4
11	11-02-2015	17:07:18	-30,214	-71,320	67,7	5,0	3
12	17-02-2015	14:35:53	-32,383	-70,988	77,5	5,8	3
13	05-03-2015	21:30:32	-29,319	-71,111	60,0	5,3	3
14	25-03-2015	19:29:11	-29,488	-69,723	118,8	5,0	1
15	16-07-2015	10:48:05	-29,533	-71,750	31,0	5,3	9
16	10-08-2015	9:40:07	-29,483	-71,216	55,1	5,1	7
17	12-08-2015	0:14:39	-31,732	-71,606	41,9	5,3	2
18	23-08-2015	23:10:03	-29,723	-71,25	50,1	6	10
19	24-08-2015	5:13:49	-29,882	-71,252	44,7	5,2	7
20	16-09-2015	22:54:28	-31,553	-71,864	11,1	8,4	12
21	16-09-2015	22:59:15	-31,618	-71,745	26,7	7,1	4
22	16-09-2015	23:03:56	-31,733	-71,677	30	6,1	3
23	16-09-2015	23:16:08	-31,901	-71,899	29,2	6,8	5
24	16-09-2015	23:18:35	-31,589	-71,791	16,5	7,6	11
25	16-09-2015	23:38:01	-31,882	-71,888	35,1	5,6	3
26	17-09-2015	0:06:18	-30,996	-71,478	38,4	5,3	3
27	17-09-2015	1:21:50	-31,719	-71,705	13,5	5,1	1
28	17-09-2015	1:33:00	-31,644	-72,1	35,1	6	2
29	17-09-2015	1:41:05	-31,113	-71,651	49,5	6,5	10

N°	Fecha	Hora (UTC)	Latitud (°)	Longitud (°)	Prof. (km)	Mag.	# Reg.
30	17-09-2015	2:59:28	-30,980	-71,364	53,7	5,5	2
31	17-09-2015	3:12:42	-30,922	-71,264	47,1	5,4	7
32	17-09-2015	3:55:15	-31,461	-71,704	53,3	5,8	9
33	17-09-2015	4:02:09	-31,247	-71,894	33,0	5,7	1
34	17-09-2015	4:10:27	-31,542	-71,748	40,7	6,6	11
35	17-09-2015	4:26:38	-31,464	-71,811	34,7	5,7	1
36	17-09-2015	5:44:41	-31,825	-71,958	25,1	5,3	1
37	17-09-2015	8:32:43	-31,601	-71,408	38,8	5,0	1
38	17-09-2015	10:31:25	-30,933	-71,459	51,1	5,0	2
39	17-09-2015	12:24:29	-31,383	-71,736	25,6	5,0	1
40	17-09-2015	14:19:15	-30,937	-71,996	32,0	5,7	1
41	17-09-2015	16:08:09	-29,854	-70,485	39,2	5,3	1
42	17-09-2015	16:46:23	-31,504	-71,737	41,8	5,0	1
43	17-09-2015	16:52:20	-29,935	-71,961	30,0	5,3	1
44	17-09-2015	20:40:34	-30,036	-71,671	32,7	5,5	9
45	17-09-2015	22:39:21	-30,937	-71,645	29,4	5,2	4
46	18-09-2015	3:15:39	-31,447	-71,530	45,1	5,2	1
47	19-09-2015	5:06:45	-29,653	-72,276	30	6,3	5
48	19-09-2015	9:07:07	-31,128	-71,578	34,2	6	9
49	19-09-2015	12:52:20	-32,326	-71,906	26,9	6,3	1
50	19-09-2015	13:09:00	-30,623	-71,908	29,4	5,7	1
51	20-09-2015	3:02:01	-30,790	-71,319	48,3	5,5	10
52	20-09-2015	14:31:08	-30,592	-71,740	38,0	5,2	4
53	21-09-2015	5:39:34	-31,759	-71,737	40,7	6,2	9
54	21-09-2015	15:37:07	-31,113	-71,792	29,8	6	2
55	21-09-2015	17:39:58	-31,759	-71,553	13	6,7	10
56	21-09-2015	18:36:53	-31,087	-71,769	31,4	5,8	2
57	21-09-2015	19:56:09	-31,77	-71,599	36,5	6	1
58	22-09-2015	7:12:59	-31,451	-71,13	63,3	6,2	10
59	22-09-2015	22:26:40	-31,024	-71,571	44,0	5,0	1
60	24-09-2015	16:13:25	-30,705	-71,398	50,0	5,4	10
61	26-09-2015	2:51:18	-30,794	-71,418	40,3	6,3	11
62	03-10-2015	6:26:56	-30,368	-71,371	33,9	6	8
63	05-10-2015	16:33:27	-30,35	-71,466	29	6,1	8
64	06-10-2015	10:47:33	-31,515	-71,446	15,1	5,1	2

N°	Fecha	Hora (UTC)	Latitud (°)	Longitud (°)	Prof. (km)	Mag.	# Reg.
65	06-10-2015	22:48:33	-30,851	-71,460	46,3	5,0	1
66	07-10-2015	8:00:40	-30,298	-71,228	24,5	5,2	8
67	09-10-2015	18:27:34	-31,764	-71,706	35,5	5,5	2
68	12-10-2015	3:15:18	-31,181	-71,786	39,1	5,4	3
69	12-10-2015	3:31:32	-31,193	-71,788	31,1	5,0	1
70	12-10-2015	16:46:42	-30,670	-71,708	35,4	5,0	2
71	15-10-2015	19:23:22	-30,573	-71,609	35,5	5,1	2
72	20-10-2015	4:06:54	-30,757	-71,456	50,2	5,0	7
73	20-10-2015	10:06:13	-30,736	-71,443	50,2	5,2	8
74	21-10-2015	18:45:46	-30,826	-71,382	50,3	5,0	2
75	24-10-2015	21:24:44	-31,438	-71,430	50,8	5,0	1
76	06-11-2015	8:44:09	-30,160	-72,131	42,2	5,1	1
77	07-11-2015	7:31:41	-30,87	-71,431	47,8	6,8	12
78	07-11-2015	10:53:42	-30,719	-71,367	48	6	11
79	10-11-2015	12:58:37	-30,798	-71,456	56,7	5	2
80	11-11-2015	1:54:36	-29,46	-72,12	32,9	6,9	9
81	11-11-2015	2:46:16	-29,552	-72,261	11,6	6,9	8
82	21-11-2015	23:05:28	-30,607	-71,797	34,9	6	9
83	07-12-2015	7:51:13	-31,131	-71,264	47,0	5,5	1
84	08-12-2015	12:56:07	-30,844	-71,713	40,3	5,6	7
85	19-12-2015	19:25:05	-30,637	-71,308	49,5	6	11
86	08-01-2016	1:11:59	-30,674	-71,657	32,5	6	1
87	29-01-2016	20:07:16	-30,363	-71,539	43,7	5,2	1
Exclusivos Estación ILLA (RENADIC)							
88	03-03-1985	22:47	-33,135	-71,871	33	8	1
89	21-11-1995	18:17	-33,23	-71,95	42	5,7	1
90	18-08-1995	8:48	-31,39	-71,96	33	5	1
91	15-10-1997	1:03	-30,93	-71,22	58	7,1	1
92	03-11-1997	19:17	-30,74	-71,22	45	6,2	1

ANEXO B. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE TROMINOS® EN MEDICIONES DE VIBRACIONES AMBIENTALES



Figura 39 – Ubicación Trominos en La Higuera (C090).



Figura 40 – Ubicación Trominos en Coquimbo (C200 y C220).



Figura 41 – Ubicación Trominos en La Serena (C010, C040, C160, C330 y C005).



Figura 42 – Ubicación Trominos en Las Tacas (C190).



Figura 43 – Ubicación Trominos en Tongoy (C260).



Figura 44 – Ubicación Trominos en Monte Patria (C110).



Figura 45 – Ubicación Trominos en Ovalla (-).



Figura 46 – Ubicación Trominos en Observatorio Cerro Tololo (GO04).



Figura 47 – Ubicación Trominos en Combarbalá (-).



Figura 48 – Ubicación Trominos en Limarí (C130).

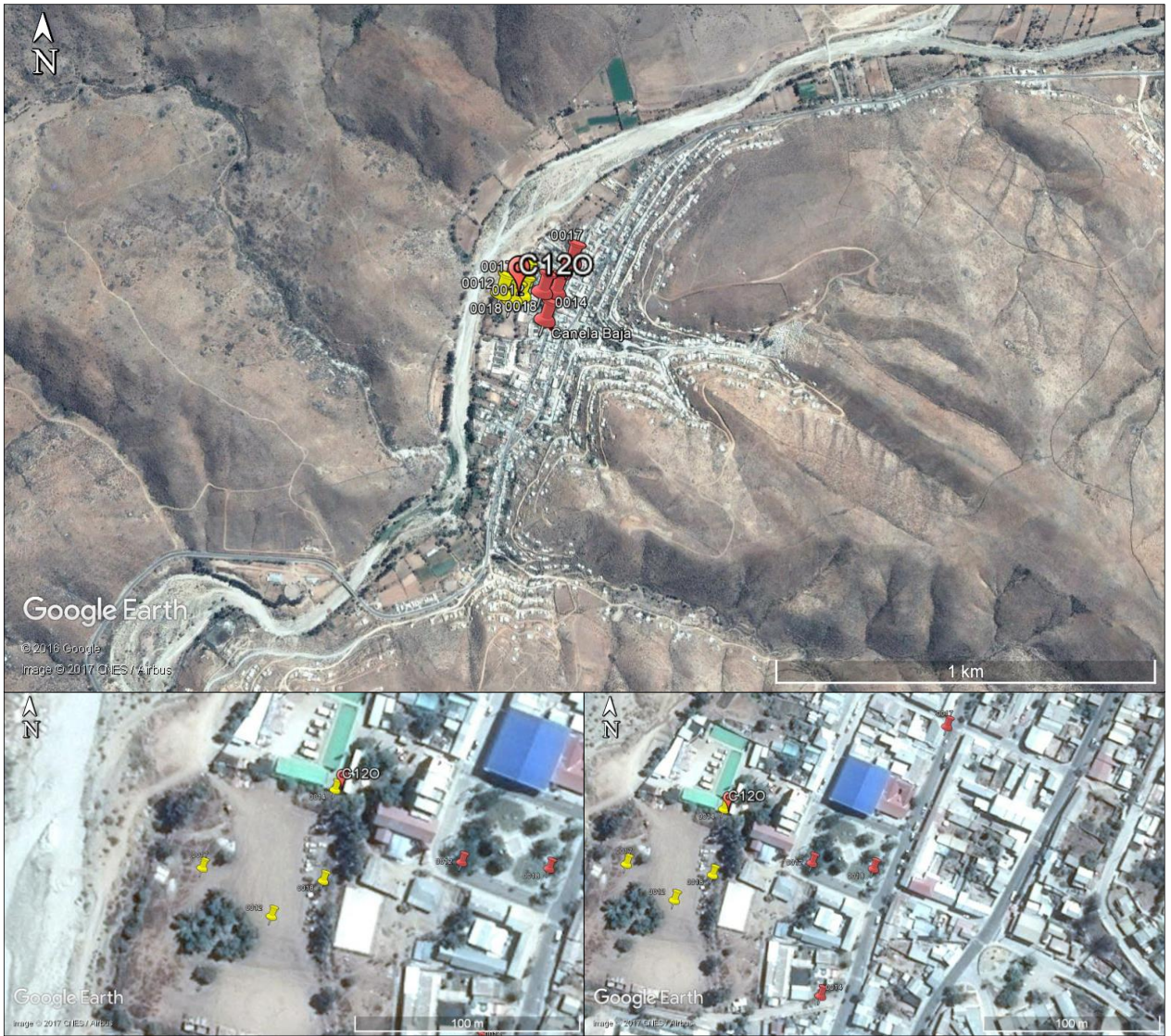


Figura 49 – Ubicación Trominos en Canela Baja (C120).



Figura 50 – Ubicación Trominos en Illapel (C070).



Figura 51 – Ubicación Trominos en Salamanca (-).



Figura 52 – Ubicación Trominos en Los Vilos (-).

ANEXO C. MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE VIVIENDAS CATASTRADAS EN ENCUESTA MINVU 2015

La encuesta empleada en el trabajo para determinar las intensidades MSK fue realizada por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo, posterior a la catástrofe. El MINVU generó un mapa con la ubicación de las viviendas catastradas que da cuenta de la distribución y alcance de la misma a largo del territorio de la Región, además de mostrar los niveles de daños. La Figura 53 corresponde al mencionado mapa.

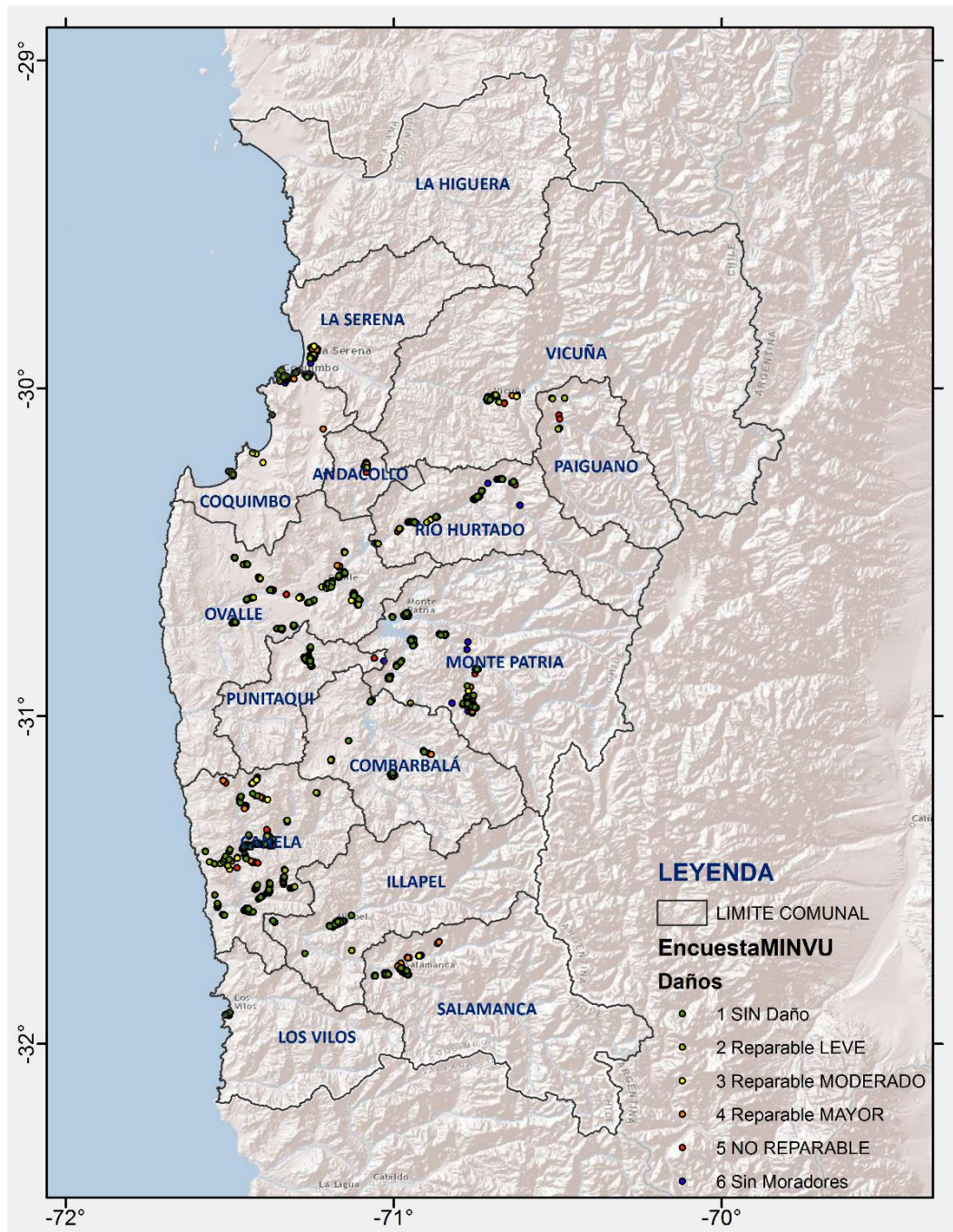


Figura 53 – Mapa de localización de las viviendas catastradas por el MINVU, luego del terremoto de Illapel 2015.

ANEXO D. MÉTODO ALTERNATIVO DE EVALUACIÓN DE DAÑOS: ESPECTROS DE CAPACIDAD Y CURVAS DE FRAGILIDAD

La tendencia actual en metodologías de estimación de daños y pérdidas por terremotos es dejar el concepto de intensidad para aplicar funciones que cuantifiquen el movimiento de suelo, analizando modelos de edificios de manera similar a como se aplica el diseño estructural (Kircher et al., 1997).

Las dos funciones usadas en esta metodología de estimación de daños generados por sismos son los **espectros de capacidad** y las **curvas de fragilidad**. Las primeras de ellas buscan estimar la respuesta máxima de cierto edificio para un nivel dado de demanda espectral, basándose en parámetros de diseño ingenieril como la capacidad de fluencia y última, caracterizando el comportamiento no lineal de las estructuras. Por otra parte, las curvas de fragilidad predicen la probabilidad de ocurrencia o excedencia de ciertos estados de daños para un nivel de respuesta sísmica peak (Kircher et al., 1997).

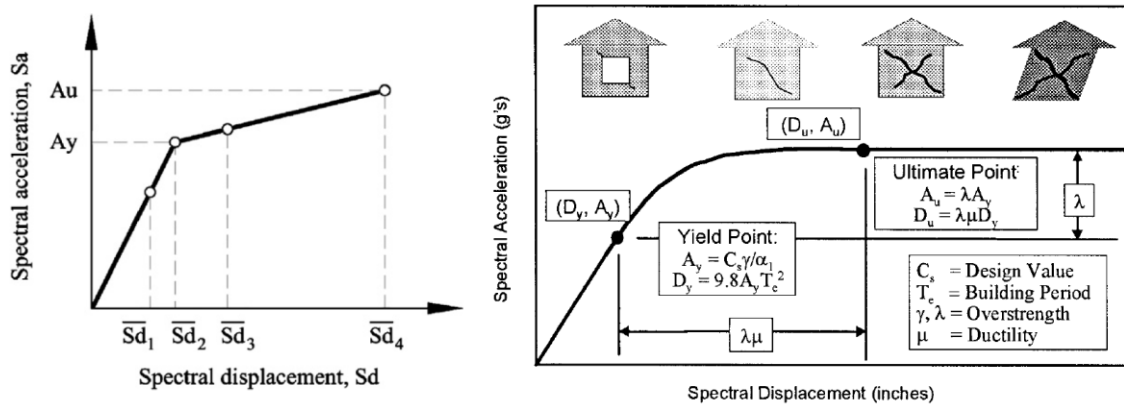


Figura 54 – Definiciones de espectros de capacidad en función de fluencia y capacidad última. Izq: Barbat et al. (2008). Der: Kiercher et al. (1997).

Los espectros de capacidad se construyen a partir de un modelo simplificado de la estructura que se requiera analizar, definiendo parámetros como periodo fundamental, ductilidad, capacidad de fluencia y última, además de su material de construcción predominante, lo que se traduce finalmente en un espectro de respuesta en aceleración – desplazamiento que considera comportamiento no lineales (Barbat et al., 2008).

Junto con lo anterior, se definen espectros de demanda en el espacio aceleración – desplazamiento de acuerdo al suelo presente en la zona sísmica de interés, donde además de las condiciones locales se incluye el sismo mediante la aceleración máxima del suelo (Barbat et al., 2008). Estos espectros se intersectan con los de capacidad, obteniendo un cierto nivel de desplazamiento para la estructura en relación al nivel de aceleraciones experimentado (ver Figura 55).

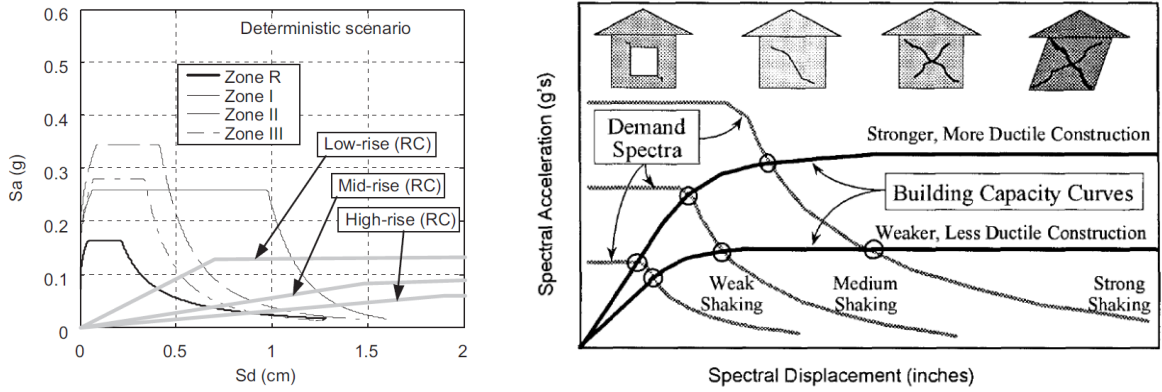


Figura 55 – Interacción entre curvas de capacidad y espectros de demanda. Izq: Barbat et al. (2008). Der: Kiercher et al. (1997).

En paralelo, y a partir del modelo de la Figura 54 es posible construir las curvas de fragilidad, las cuales se definen para cierto nivel de daños. En el caso de la aplicación a la ciudad de Barcelona (Barbat et al., 2008) se emplean 5 estados de daños: sin daños, leve, moderado, severo y completo. Luego, se asume que las curvas siguen una distribución de probabilidad *lognormal*, quedando definidas por dos parámetros únicamente: desplazamiento espectral promedio (para cada estado de daño) y su desviación estándar, de acuerdo a la siguiente función.

$$P \left[\frac{ds_i}{S_d} \right] = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{ds_i}} \cdot \ln \left(\frac{S_d}{\bar{S}_{d_{ds_i}}} \right) \right] \quad (4)$$

Donde $\bar{S}_{d_{ds_i}}$ corresponde al desplazamiento espectral al cual la probabilidad de daño para el estado ds_i es del 50%, β_{ds_i} es la desviación estándar del logaritmo natural para el desplazamiento espectral anterior, Φ es la función de distribución acumulativa normal estándar y S_d es el desplazamiento espectral. El resultado de la metodología anterior es del tipo de la Figura 56, donde se muestran las 4 curvas.

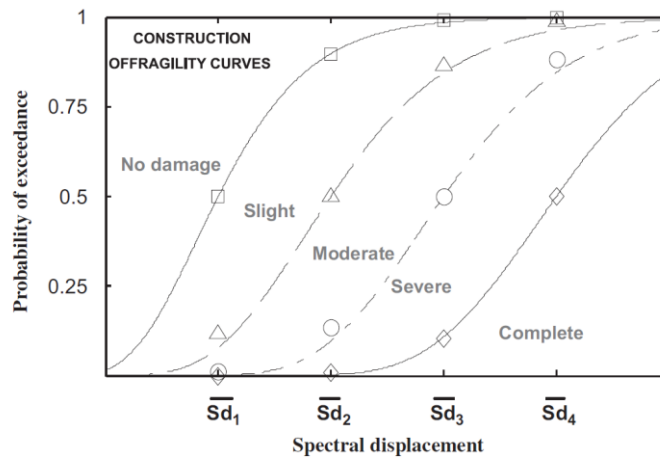


Figura 56 – Ejemplo de Curvas de Fragilidad, considerando los desplazamientos espectral promedio de la Figura 54. Izq (Barbat et al., 2008).

Finalmente, a partir del resultado de desplazamiento espectral en la intersección del espectro de capacidad y de demanda (Figura 55) se ingresa a las curvas de fragilidad de la Figura 56 para obtener un valor de probabilidad de daños para cierto tipo de estructura, zona y sismo. Esto permite generar una **matriz de probabilidad de daño** para distintos escenarios de riesgo sísmico.

La metodología permite realizar una extensión a la evaluación económica, además del análisis de estructuras contemporáneas e históricas en cuanto se tenga un modelo estructural representativo. También permite una mejora en la planificación tanto del crecimiento de una localidad como del plan de manejo del riesgo y planificación ante emergencias para protección civil (Martinelli et al., 2008). A la fecha ha sido aplicada en varias ciudades como Barcelona, España (Barbat et al., 2008); Celano, Italia (Martinelli et al., 2008); Tesalónica, Grecia (Kappos et al., 2008).