



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

**SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN MASA Y DE RESPUESTA  
SÍSMICA ASOCIADA A FALLAS MAYORES EN ZONAS URBANAS.  
ESTUDIO DE CASO EN VIÑA DEL MAR, V REGIÓN**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE  
MAGÍSTER EN CIENCIAS MENCIÓN GEOLOGÍA**

ELEONORA MUÑOZ MORALES

PROFESOR GUIA:  
SERGIO ANDRÉS SEPULVEDA VALENZUELA

MIEMBROS DE LA COMISION:

MARISOL LARA CASTILLO  
FELIPE LEYTON FLOREZ  
SOFIA REBOLLEDO LEMUS

SANTIAGO DE CHILE  
2013

## RESUMEN

El último evento sísmico que afectó el centro-sur de Chile el 27 de febrero del 2010 dejó al descubierto la necesidad de actualizar algunos planes reguladores en distintas comunas, incorporando la variable de zonas de riesgo por amenazas naturales, tales como sismos, remociones en masa, volcanismo, tsunamis y fallas geológicas explicitadas en la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción (O.G.U.C.).

En este estudio, considerando la susceptibilidad como la posibilidad que una zona se vea afectada por un determinado proceso -expresada en grados cualitativos y relativos- se desarrollaron metodologías orientadas a determinar la susceptibilidad de sectores urbanos ante remociones en masa y una posible respuesta sísmica diferencial por la presencia de fallas mayores. Ambas metodologías se basan en la ponderación de factores condicionantes definidos como relevantes para la ocurrencia del fenómeno. La metodología propuesta para evaluar las remociones en masa en áreas urbanas (considerando mecanismos de tipo deslizamientos, caídas y flujos) se definió a partir de ajustes introducidos a la metodología propuesta por Lara (2007), que considera ponderadores de las variables que condicionan la ocurrencia de remociones, como por ejemplo características geológicas, geomorfológicas y geotécnicas de los materiales, antecedentes de remociones anteriores, condiciones climáticas e influencia de las obras antrópicas en la ocurrencia de eventos.

La metodología propuesta para evaluar la respuesta sísmica por fallas mayores (entendida como la posibilidad que una zona presente deformaciones superficiales, rupturas superficiales o una mayor intensidad y daño ante sismos), considera por un lado la ponderación de antecedentes relacionados a la estructura (evidencias geológicas y geomorfológicas de su existencia y posible actividad reciente), así como antecedentes de daños registrados en sismos históricos en el entorno de la falla.

Ambas metodologías fueron validadas mediante su aplicación en la ciudad de Viña del Mar. En esta ciudad la geomorfología define sectores urbanos con altas pendientes donde ocurren eventos de remoción en masa de menor escala en forma recurrente (al menos 3 eventos al año), y donde además se proyecta la falla Marga-Marga por debajo de la ciudad. Los resultados muestran la existencia de algunas laderas urbanas altamente susceptibles a verse afectadas por distintos tipos de remociones en masa, principalmente deslizamientos y caídas de bloques en unidades de roca, deslizamientos superficiales de suelo y flujos en zonas de quebradas. Por otra parte, la metodología propuesta y utilizada en este estudio permitió definir una franja paralela a la falla a la falla Marga-Marga con alta susceptibilidad de sufrir una respuesta sísmica comparativamente peor que el resto del área ante sismos de gran magnitud, y justificaría la profundización de estudios específicos de amenaza sísmica.

*A mi Flora regalona,  
por todo su apoyo, amor  
y comprensión.*

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar se agradece el apoyo y confianza depositada en mí y en el trabajo por parte del profesor guía, Sergio Sepúlveda.

A mis padres y hermanos, quienes me apoyaron permanentemente en el desarrollo de la tesis.

Al Sr. Waldo Romero, Geógrafo de la Oficina de Catastro y proyecto de la Dirección de Obras Municipales de Viña de Mar, quien facilitó información relevante para este estudio. Al Dr. Robert Thorson, quien además de ser una fuente de motivación con su estudio del año 1999, respondió vía email consultas y facilitó información adicional relacionada a su estudio y estaba en Chile.

A Marisol Lara y Sofía Rebolledo, por atender mis consultas y entregar buenas sugerencias.

Al Profesor Carlos Aguirre de la Universidad Técnica Federico Santa María, y a los ingenieros civiles Rocío Castañeda, Carlos Nuñez, Alfonso González y Osvaldo Carrasco, por su apoyo y aportes al presente estudio

A mis amigas y amigos, por darme ánimo en forma permanente y estar ahí (Paula, Dani Muñoz, Marcelo, Marcela, María Jesús, Chino, Jojis y Francisco). A Karen, por su preocupación y apoyo. A Ximena y Eduardo (UNAB) por facilitarme las visitas a Santiago y apoyarme en este proceso. Finalmente se agradece a la empresa E-Mining Technology S.A, quien facilitó sus oficinas para el desarrollo del modelo estratigráfico de suelo.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>Capítulo 1</b>	Introducción.....	1
1.1	Introducción.....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Metodología.....	2
<b>Capítulo 2</b>	Marco teórico del estudio.....	4
2.1	Definiciones relevantes.....	4
2.2	Amenazas consideradas en este estudio.....	5
2.2.1	Sismos.....	6
2.2.2	Remociones en masa.....	10
2.2.2.1	Clasificación de remociones en masa.....	11
2.2.2.2	Factores condicionantes y desencadenantes de remociones en masa.....	13
<b>Capítulo 3</b>	Metodología propuesta para la evaluación de susceptibilidad de remociones en masa en áreas urbanas.....	18
3.1	Introducción.....	18
3.2	Metodología propuesta.....	20
3.2.1	Definición de unidades de análisis y escala de trabajo.....	20
3.2.2	Factores condicionantes considerados.....	20
3.2.3	Susceptibilidad para caídas de rocas.....	23
3.2.4	Susceptibilidad para deslizamientos traslacionales de roca.....	26
3.2.5	Susceptibilidad para deslizamientos rotacionales.....	28
3.2.6	Susceptibilidad para deslizamientos superficiales de suelo.....	30
3.2.7	Susceptibilidad para flujos.....	32
3.3	Alcances de la metodología.....	34
3.4	Etapas siguientes: análisis de estabilidad de unidades críticas y entrega de recomendaciones....	35
<b>Capítulo 4</b>	Metodología propuesta para la evaluación de susceptibilidad de respuesta sísmica asociada a fallas mayores en áreas urbanas.....	37
4.1	Introducción.....	37
4.2	Metodología propuesta.....	39
4.2.1	Unidades de análisis.....	41

4.2.2	Factores condicionantes y ponderadores propuestos.....	41
4.2.3	Alcances de la metodología.....	45
<b>Capítulo 5</b>	<b>Área de estudio de caso Viña del Mar – V región Chile Central.....</b>	<b>46</b>
5.1	Ubicación general y accesos.....	46
5.2	Marco geomorfológico.....	47
5.2.1	Antecedentes.....	47
5.2.2	Modelos de pendientes y elevación digital.....	54
5.3	Marco geológico.....	58
5.3.1	Antecedentes.....	58
5.3.2	Marco geológico regional.....	62
5.3.3	Geología Comuna de Valparaíso.....	72
5.3.4	Geología Comuna de Viña del Mar.....	74
5.3.5	Geología del cuaternario del plan de la ciudad de Viña del Mar.....	85
5.3.5.1	Antecedentes de evolución paleogeográfica del plan de Viña.....	85
5.3.5.2	Profundidad del basamento rocoso.....	87
5.3.5.3	Geología de los primeros 30 metros bajo superficie en el plan.....	88
5.3.6	Geología estructural.....	93
<b>Capítulo 6</b>	<b>Susceptibilidad de remociones en masa en áreas urbanas en Viña del Mar.....</b>	<b>97</b>
6.1	Tipos de procesos más comunes en la zona de estudio.....	97
6.2	Catastro de remociones en masa.....	101
6.3	Aplicación de la metodología de Lara (2007) en la zona de estudio.....	101
6.4	Definición de unidades de estudio.....	102
6.4.1	Caracterización geotécnica de las unidades.....	108
6.4.2	Clima y vegetación.....	110
6.5	Aplicación de metodología que evalúa susceptibilidad de remociones en masa en áreas urbanas.....	111
<b>Capítulo 7</b>	<b>Susceptibilidad de respuesta sísmica por falla Marga-Marga, ciudad de Viña del Mar.....</b>	<b>117</b>
7.1	Antecedentes y estudios anteriores.....	117
7.1.1	Antecedentes geológicos y geomorfológicos.....	117
7.1.2	Antecedentes sísmicos del área.....	122

7.1.3	Antecedentes de daños en el plan de Viña causados por sismos históricos.....	123
7.1.3.1	El terremoto del 16 de agosto de 1906.....	123
7.1.3.2	El terremoto de marzo de 1985.....	124
7.1.4	Antecedentes de potencial sísmico.....	127
7.1.5	Otros antecedentes.....	128
7.2	Antecedentes aportados por este trabajo.....	129
7.2.1	Antecedentes de daños en el plan de Viña del Mar por el terremoto de febrero 2010...	129
7.2.2	Traza de la falla Marga-Marga.....	130
7.2.3	Datos geodésicos plan de Viña.....	139
7.2.4	Evidencias de actividad reciente.....	140
7.3	Traza(s) de falla Marga-Marga definida por este trabajo.....	143
7.4	Aplicación de la metodología para evaluar susceptibilidad de respuesta sísmica por fallas mayores.....	145
<b>Capítulo 8</b>	<b>Discusión.....</b>	<b>149</b>
<b>Capítulo 9</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>156</b>
<b>Referencias.....</b>		<b>158</b>
Anexo A	Tablas Lara, M. 2007	
Anexo B	RMR Bieniawski	
Anexo C	Ejemplo de técnicas de análisis de unidades críticas y entrega de recomendaciones	
Anexo D	Mapa Geológico Simplificado	
Anexo E	Catastro de Remociones en Masa	
Anexo F	Fotos Unidades	
Anexo G	Caracterización de suelos Unidad 14 Recreo	
Anexo H	Valores de parámetros rocas y suelos	
Anexo I	Mapas Susceptibilidad Remociones en Masa	
Anexo J	Ponderadores por unidad Remociones en Masa	
Anexo K	Ejemplo de análisis de estabilidad para dos unidades con Susceptibilidad alta y muy alta	
Anexo L	Mapas Susceptibilidad Falla Marga-Marga	
Anexo M	Ponderadores Susceptibilidad de falla Marga-Marga	
Anexo N	Aplicación de la metodología para evaluar susceptibilidad de respuesta sísmica por fallas mayores en Valparaíso (sector Av. Argentina)	

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Sismicidad histórica en la tierra entre 1900 y 2010.....	6
Figura 2.2	Esquema de subducción en Chile mostrando fuentes sismogénicas.....	7
Figura 2.3	Relación entre el material del sustrato y la amplificación de vibración durante un terremoto....	9
Figura 2.4	Algunos tipos de remociones en masa.....	13
Figura 4.1	Esquema mostrando de forma gráfica como abordar la metodología propuesta.....	40
Figura 5.1	Ubicación de la Comuna de Viña del Mar en la V región.....	46
Figura 5.2	Unidades Geomorfológicas V región de Valparaíso.....	47
Figura 5.3	Perfil geomorfológico de la costa entre Aconcagua y Quintay mostrando dislocaciones tectónicas generadas por fallas .....	48
Figura 5.4	Imagen satelital Google Earth de la zona de estudio.....	49
Figura 5.5	Perfil geomorfológico V Región.....	49
Figura 5.6	Mapa Hipsométrico de Viña del Mar.....	55
Figura 5.7	Mapa Hipsométrico de Valparaíso.....	56
Figura 5.8	Mapa de Pendientes de Viña del Mar.....	57
Figura 5.9	Mapa de Pendientes de Valparaíso.....	58
Figura 5.10	Imagen de Mapa Geológico Gana et al (1996) Sector Valparaíso y Viña del Mar. Escala 1:100000.....	60
Figura 5.11	Imagen de Mapa Geológico Álvarez (1964) Sector Valparaíso y Viña del Mar. Escala 1:50000.....	61
Figura 5.12	Imagen de Mapa Geológico Quillota Portillo Rivano et al (1993). Escala 1:250.000 Sector Reñaca.....	62
Figura 5.13	Mapa Geológico Simplificado sector Valparaíso, Viña del Mar y Reñaca. Escala 1:50.000.....	71
Figura 5.14	Mapa Geológico Simplificado sector Valparaíso.....	73
Figura 5.15	Sectores recorridos en Viña del Mar.....	75
Figura 5.16	Sectores recorridos entre Viña del Mar y Reñaca.....	75
Figura 5.17	Mapa Geológico Simplificado 1:50.000 Viña del Mar y Reñaca.....	76
Figura 5.18	Paleo ambientes desarrollado entre 8 mil y 5 mil años atrás en el Plan de Viña del Mar.....	86
Figura 5.19	Geometría del basamento rocoso bajo el Plan de Viña del Mar determinado a partir de estudios gravimétricos (Verdugo, 1996).....	87
Figura 5.20	Ubicación de sondajes – Viña del Mar.....	88
Figura 5.21	Proyección de unidades geológicas 3 metros bajo la superficie actual.....	89



Figura 5.22	Proyección de unidades geológicas 11 metros bajo la superficie actual.....	90
Figura 5.23	Proyección de unidades geológicas 18 metros bajo la superficie actual.....	90
Figura 5.24	Proyección de unidades geológicas 21 metros bajo la superficie actual.....	91
Figura 5.25	Interpretación de unidades de suelo 13 metros bajo la actual superficie.....	92
Figura 5.26	Interpretación de unidades de suelo 21 metros bajo la actual superficie.....	92
Figura 5.27	Lineamientos y fallas reconocidas por Gana et al. (1996) y Álvarez (1964) en Viña del Mar....	94
Figura 5.28	Lineamientos y fallas reconocidas por Gana et al. (1996) y Álvarez (1964) en Valparaíso.....	94
Figura 6.1	Caídas de rocas sector acantilado rocoso costero entre Reñaca y Concón.....	97
Figura 6.2	Registros de eventos de tipo flujo de barro y detritos en sector Reñaca. Izquierda: aluvión de Reñaca 1984. Derecha. Flujo de barro y detritos 2010.....	98
Figura 6.3	Registros de eventos de tipo deslizamiento de cuñas en camino costero sector Reñaca – Las Salinas.....	98
Figura 6.4	Registros de eventos de tipo deslizamiento rotacional sector Reñaca Cochoa en arenas de dunas.....	99
Figura 6.5	Registros de eventos de tipo desprendimiento en acantilados costeros y la influencia del control estructural en la morfología final.....	100
Figura 6.6	Registros de eventos de tipo caídas de roca y material asociados a erosión costera (camino Reñaca – Concón).....	100
Figura 6.7	Unidades de análisis sector Canal Beagle.....	103
Figura 6.8	Unidades de análisis sector Recreo.....	104
Figura 6.9	Unidades de análisis sector 5 Oriente.....	105
Figura 6.10	Unidades de análisis sector Coraceros.....	106
Figura 6.11	Unidades de análisis sector Cerro Castillo.....	107
Figura 6.12	Unidades de análisis sector Las Salinas – Reñaca.....	108
Figura 6.13	Puntos de Clasificación de macizo rocoso. (a) Sector Coraceros – Unidades 0, 1, 2, 3; (b) Sector Cerro Castillo Unidades 2 y 5; (c) Sector Recreo – Unidades 8 y 9.....	109
Figura 6.14	Mapa resultado mostrando Índice de Susceptibilidad ante Caídas de Rocas Sector Cerro Castillo.....	112
Figura 6.15	Mapa resultado mostrando Índice de Susceptibilidad ante Deslizamientos Traslacionales Sector 5 Oriente.....	113
Figura 7.1	Extracto de mapa Geología del Área de Valparaíso y Viña del Mar escala 1:50.000 (Álvarez, 1964) mostrando la traza de la falla Marga-Marga en la Población Vergara (Viña del Mar).....	118
Figura 7.2	Extracto de Mapa Geológico Área Valparaíso – Curacaví. Gana et al. (1996) mostrando el línea roja el sistema de fallas Marga-Marga.....	119
Figura 7.3	Extracto de Mapa Geológico Área Valparaíso – Curacaví (Gana et al., 1996) mostrando la traza de la falla Marga-Marga en el entorno de la ciudad de Viña del Mar.....	119

Figura 7.4	Mapa presentado evidencias de terreno reconocidas por Thorson (1999). Se destaca el reconocimiento de una zona de brecha de falla con presencia de microestructuras.....	121
Figura 7.5	Esquema presentado por Thorson (1999) indicando evidencias de actividad cuaternaria de la actividad de la falla Marga-Marga en depósitos de Estratos de Potrero Alto (TQPa) y suelos cuaternarios.....	122
Figura 7.6	Lineamientos reconocidos a partir de fotografías aéreas de 1954 y 1996, más daño de edificios por terremoto 1985.....	125
Figura 7.7	Ubicación de la falla Marga-Marga según estudio de Galdames y Saragoni, 2002.....	126
Figura 7.8	Zona de falla Marga-Marga, identificando 5 segmentos de la traza de la falla (Sabaj, 2008). El segmento 1.1 corresponde a la traza identificada por Gana et al., 1996.....	127
Figura 7.9	Inventario de daños importantes producto del terremoto 2010.....	129
Figura 7.10	Sectores con mayor daño en terremotos de 1906, 1985 y 2010.....	130
Figura 7.11	Ubicación de trazas de falla Marga-Marga definida por Álvarez (1964) y Galdames y Saragoni (2002).....	131
Figura 7.12	Ubicación de sectores recorridos en terreno.....	132
Figura 7.13	Roseta mostrando orientaciones preferenciales obtenidos a partir de la toma de datos puntuales en talud con orientación NW. Se reconoce S1: NE; S2: NW; S3: EW.....	133
Figura 7.14	Ubicación de sector 2 recorrido en terreno, mostrando la ubicación de las Fotografías 7.5, 7.6 y 7.7.....	136
Figura 7.15	Ubicación de estaciones catastradas pre y post terremoto mostrando las diferencias mayores registradas en las mediciones.....	139
Figura 7.16	Ubicación de área recorrida en terreno Formación TQPa, entre Canal Beagle y Túnel del Jardín Botánico.....	140
Figura 7.17	Traza de falla Marga-Marga propuesta por este trabajo (línea segmentada color rojo).....	143
Figura 7.18	Ubicación de las trazas de falla de la falla Marga-Marga propuestas por este trabajo (lineamientos norte y sur).....	144
Figura 7.19	Unidades de análisis para susceptibilidad de respuesta sísmica por falla Marga-Marga, Viña del Mar.....	147
Figura 7.20	Susceptibilidad de respuesta sísmica por falla Marga-Marga – Viña del Mar.....	148
Figura 8.1	Mapa de respuesta sísmica con falla Av. Argentina – Valparaíso.....	155

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 3.1	Ejemplo de autoconstrucciones en zonas con fuertes pendientes.....	36
Fotografía 5.1	Vista general bahía de Valparaíso mostrando sector plano (antigua playa cubierta por construcciones) y crecimiento de la ciudad hacia sectores altos (terrazas).....	50
Fotografía 5.2	Vista laderas artificiales sector costero entre Valparaíso y Viña del Mar mostrando fuertes pendientes.....	51
Fotografía 5.3	Vista global morfología tipo terrazas sector norte estero Marga-Marga.....	52
Fotografía 5.4	Vista global morfología tipo terrazas sector sur estero Marga-Marga.....	53
Fotografía 5.5	Vista al sur de sector Reñaca indicando morfología de bahías y acantilados con sectores altos planos en dunas, con fuerte desarrollo inmobiliario.....	53
Fotografía 5.6	Vista sector Reñaca – Concón evidenciando acantilado costero de fuertes pendientes rocoso y sector dunario con zonas de remoción de vegetación con fines inmobiliarios.....	53
Fotografía 5.7	Vista norte de diques afaníticos (oscuros) cortando unidades de rocas intrusivas paleozoicas.....	65
Fotografía 5.8	Evidencias de procesos erosivos y de meteorización (cárcavas) presentes en paleodunas.....	69
Fotografía 5.9	Evidencias de procesos erosivos y meteorización (cárcavas) en paleodunas y rocas intrusivas.....	70
Fotografía 5.10	Vista de depósitos estuariales en Av. Washington.....	74
Fotografía 5.11	Rocas intrusivas sector Recreo (Av. España, Sector Escuela Industrial).....	77
Fotografía 5.12	Rocas intrusivas sector Valparaíso Sporting Club.....	78
Fotografía 5.13	Rocas intrusivas jurásicas sector 5 Oriente (talud ex Maestranza). Se destaca vetas de cuarzo-feldespatos cortando afloramiento.....	78
Fotografía 5.14	Unidad Tn (Terrazas Marinas) sector 5 Oriente con 12 norte.....	79
Fotografía 5.15	Unidad Tn (Terrazas Marinas) sector Santa Inés (Av. Alessandri).....	80
Fotografía 5.16	Terrazas Marinas (Tn) sector Cerro Castillo (Av. España).....	80
Fotografía 5.17	Unidad TQPa – Estratos de Potrero Alto (estuariales – continental) en discordancia sobre rocas intrusivas Jurásicas sector Sporting Club.....	81
Fotografía 5.18	Unidad TQPa – Estratos de Potrero Alto (estuariales – continental) aflorando en el sector Valparaíso Sporting Club.....	82
Fotografía 5.19	Unidad TQPa- Estratos de Potrero Alto (estuariales – continental) sector Canal Beagle...	82
Fotografía 5.20	Unidad TQPa – Estratos de Potrero Alto (estuariales – continental) sector Canal Beagle.	83
Fotografía 5.21	Paleodunas sector Reñaca.....	84
Fotografía 5.22	Dunas y Paleodunas sector Reñaca con muestras evidentes de intervención Inmobiliaria.....	84

Fotografía 5.23	Foliación en rocas del Complejo Metamórfico Valparaíso.....	95
Fotografía 5.24	Diaclasamiento del macizo rocoso intrusivo jurásico.....	96
Fotografía 7.1	Talud ruta Las Palmas en dirección a Viña del Mar donde se reconoció una falla mayor que correspondería a la traza mapeada por Gana et al. (1996) y asociada a la falla Marga-Marga.....	120
Fotografía 7.2	Daños locales en techos de casas ubicadas sobre el trazado de la falla Marga-Marga (1 Norte con 5 Oriente) producto del terremoto de 1985.....	125
Fotografía 7.3.a	Talud rumbo N40°W, mostrando zona de cizalle, con presencia de fallas y planos de debilidad. Baja resistencia de la roca (dureza estimada R1 a R2), que queda en evidencia por las marcas de remoción del material sin necesidad de explosivos.....	134
Fotografía 7.3.b	Muestra Detalle fotografía 7.3.a.....	134
Fotografía 7.4.a.	Talud NW, mostrando zona de cizalle, con presencia de fallas y planos de debilidad. Baja resistencia de la roca (dureza estimada R1 a R2).....	135
Fotografía 7.4.b	Detalle de falla mostrando estrías con dirección 46°S y evidencias de movimiento de tipo sinistral inverso.....	135
Fotografía 7.5	Vista mirando al Noroeste tomada desde el inicio de la curva de Estero Marga-Marga (Norte de puente ferroviario), mostrando la orientación natural de las laderas (NW).....	137
Fotografía 7.6	Vista mirando al Sureste, tomada desde en el cambio de rumbo del estero (de NW a NS) mostrando el control estructural que tienen las laderas de terrazas fluviales (rumbo N40°W).....	138
Fotografía 7.7	Vista mirando al Suroeste, tomada hacia ladera sur de estero, frente a puente ferrocarril. Se evidencia fuerte control estructural que tienen las laderas de terrazas por planos N50°W (S1) y sistema perpendicular N30°E (S2).....	138
Fotografía 7.8	Unidad Estratos de Potrero Alto (TQpa) mostrando evidencias de deformación.....	141
Fotografía 7.9	Unidad Estratos de Potrero Alto (TQpa) mostrando evidencias de deformación .....	141
Fotografía 7.10	Unidad Estratos de Potrero Alto (TQpa) mostrando evidencias de deformación.....	142
Fotografía 8.1	Unidad 3 – Recreo (2012).....	152
Fotografía 8.2	Deslizamiento de suelo unidad 3 – Recreo (10/6/2013).....	152
Fotografía 8.3	Deslizamiento de suelo unidad 3 – Recreo (10/6/2013).....	153

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Clasificación de Remociones en Masa según Varnes (1978).....	11
Tabla 3.1	Factores condicionantes y ponderación propuesta por Lara (2007) para caídas de rocas....	19
Tabla 3.2	Factores máximos considerados en caídas de rocas.....	24
Tabla 3.3	Desglose de factores y peso (en %) para cada rango en caídas de rocas.....	25
Tabla 3.4	Factores máximos considerados en deslizamientos traslacionales de roca.....	26
Tabla 3.5	Desglose de factores y peso (en %) para cada rango de deslizamientos traslacionales.....	27
Tabla 3.6	Factores máximos considerados en deslizamientos rotacionales.....	28
Tabla 3.7	Desglose de factores y peso (en %) para cada rango en deslizamientos rotacionales.....	29
Tabla 3.8	Factores máximos considerados en deslizamientos en suelo.....	30
Tabla 3.9	Desglose de factores y peso (en %) para cada rango en deslizamientos superficiales de Suelo.....	31
Tabla 3.10	Factores máximos considerados en flujos.....	32
Tabla 3.11	Desglose de factores y peso (en %) para cada rango en mecanismos tipo flujo.....	33
Tabla 4.1	Factores máximos considerados para evaluar susceptibilidad por fallas mayores.....	43
Tabla 4.2	Desglose de factores y peso (en %) para cada rango.....	52
Tabla 5.1	Unidades utilizadas para la clasificación de estratos a partir de descripción de Sondajes en Viña del Mar.....	89
Tabla 6.1	Tipo de remociones en masa esperadas para cada unidad geotécnica.....	111
Tabla 6.2	Resultados sectores Canal Beagle y Reñaca – Las Salinas.....	114
Tabla 6.3	Resultados sectores Coraceros, Cerro Castillo, 5 Oriente y Recreo.....	115
Tabla 7.1	Índice de susceptibilidad de respuesta sísmica para unidades analizadas en Viña del Mar...	146

## **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. INTRODUCCIÓN**

La ocurrencia de eventos asociados a fenómenos naturales que se manifiestan bruscamente en superficie ha estado siempre presente. Desde la aparición del hombre hasta hoy en día el conocimiento sobre estos fenómenos ha evolucionado, dejando de ser castigos divinos y pasando a ser fenómenos comprensibles, en algunos casos predecibles y en ocasiones, hasta evitables.

Con la explosión demográfica a nivel mundial estos fenómenos han adquirido mayor importancia, debido a la ocupación de terrenos escarpados y la construcción de grandes ciudades con complejas obras de ingeniería. En el mismo sentido, la tendencia ha sido que los fenómenos naturales sean considerados dentro de la planificación del territorio o que sean incluidos como una variable más a analizar dentro de obras de ingeniería. Según Ayala-Carcedo (2002), la actitud social y política adoptada ante los desastres naturales ha ido cambiando con el tiempo. A partir de la década de los 80 se genera un reconocimiento del deterioro ambiental causado por el hombre y por otro lado se hace un llamado desde la racionalidad científica a la adopción de medidas de reducción de desastres, mediante sistemas de alerta temprana, ordenamiento del territorio y adopción de medidas curativas post desastre.

Si bien en Chile existen leyes que permiten la definición de áreas de construcción condicionada producto de amenazas naturales (como la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción, artículo 2.1.17) y existen estudios a escala regional y comunal que definen zonas sensibles a la ocurrencia de estos eventos naturales (como por ejemplo estudios fundados de riesgos para planes reguladores comunales e intercomunales), en algunas ocasiones la escala de dichos estudios impide abordar aquellos eventos cuya ocurrencia es a menor escala, pero que en zonas urbanas pueden resultar desastrosos para las personas y la dinámica de las ciudades.

Lo anterior ha motivado el presente estudio, en el cual se atenderán algunos casos de amenazas naturales en áreas urbanas que por la escala en la que se manifiestan quedan fuera de los estudios comunales o regionales existentes, o bien, en los que la problemática a resolver no está del todo detallada bajo la actual legislación. El problema se abordará mediante la generación de metodologías que permitan determinar la sensibilidad que presentan algunos sectores urbanos a la ocurrencia de remociones en masa y de respuesta sísmica por la presencia de fallas mayores, y así generar una herramienta que permita orientar los estudios futuros orientados a minimizar las posibles consecuencias.

### **1.2. OBJETIVOS**

El objetivo general de la presente tesis es formular una metodología que permita determinar índices de susceptibilidad en zonas urbanas ante la ocurrencia de remociones en masa y de posible respuesta sísmica por presencia de fallas mayores, con aplicación en la comuna de Viña del Mar, V Región, Chile Central.

Los objetivos específicos planteados, se dividen en dos grupos en función de la problemática planteada.

Para el caso de remociones en masa son:

- Definir los tipos de remociones en masa más frecuentes en áreas urbanas y aquellas cuyo impacto puede ser minimizado mediante la introducción de obras antrópicas.
- Determinar los factores que condicionan la ocurrencia de dichos eventos, cuantificando su importancia.
- Diseñar una metodología para determinar un índice de susceptibilidad de remociones en áreas urbanas a partir de la ponderación de factores condicionantes.
- Actualizar el catastro de eventos de remociones en masa en las comunas de Valparaíso y Viña del Mar.
- Aplicar la metodología desarrollada en algunas laderas urbanas de la ciudad de Viña del Mar.
- Evaluar la estabilidad de algunas laderas representativas que presenten alta susceptibilidad de remociones en masa a modo de ejemplificar estudios posteriores.

Para el estudio de la respuesta sísmica en áreas urbanas por la presencia de fallas mayores, se plantean los siguientes objetivos específicos definidos a partir de la existencia de una falla mayor que atraviese una zona urbana:

- Identificar los antecedentes y condicionantes que permitan evaluar la posible respuesta sísmica de áreas urbanas atravesadas por fallas mayores.
- Desarrollar una metodología que permita determinar un índice de susceptibilidad de respuesta sísmica en áreas urbanas atravesadas por fallas mayores a partir de la ponderación de los factores identificados y antecedentes recopilados.
- Aplicar la metodología a un estudio de caso en la comuna de Viña del Mar.

### 1.3. METODOLOGÍA

La metodología de trabajo utilizada para la elaboración del presente estudio se basa en una primera etapa orientada a formular el problema a resolver y desarrollar las metodologías para evaluar susceptibilidad, y una segunda etapa orientada a aplicar ambas metodologías desarrolladas en un caso de estudio.

Para el estudio de remociones en masa, se desarrollan las siguientes actividades:

- Recopilación de información referida a eventos de remociones en masa ocurridos en áreas urbanas e identificación de los factores controladores de dichos eventos, evaluando la influencia de obras antrópicas en su ocurrencia.
- A partir de los datos recopilados, se definen los tipos de remociones en masa más frecuentes en áreas urbanas.

- Mediante ajustes introducidos a la metodología propuesta por Lara (2007) se generan tablas para evaluar susceptibilidad de remociones en masa a escala urbana a partir de la ponderación de factores condicionantes.
- Recopilación de antecedentes de las comunas de Viña del Mar y Valparaíso, en términos de geología, geomorfología, catastro histórico de eventos de remociones en masa, estudios de riesgo y peligro de dichos eventos.
- A partir del análisis de la información existente y visitas a terreno orientadas a validar la información recopilada, se realiza una descripción y caracterización geológica y geomorfológica del área de estudio, con especial énfasis en la comuna de Viña del Mar.
- Definición de sectores específicos a estudiar dentro de la comuna de Viña del Mar a partir de criterios de geológicos, geomorfológicos, urbanos y de accesibilidad.
- Aplicación de la metodología propuesta en el área de estudio y validación de resultados a partir de visitas a terreno, registro y estudio de casos declarados.
- A modo de ejemplo, se realiza la evaluación de la estabilidad en algunos casos con alta susceptibilidad, generando recomendaciones específicas para los casos puntuales analizados.

Para evaluar la susceptibilidad de una posible respuesta sísmica asociada a la presencia de fallas mayores en áreas urbanas, se desarrollan las siguientes actividades:

- Definición de una metodología para evaluar la susceptibilidad de respuesta sísmica producto de la existencia y cercanía a una falla mayor en áreas urbanas a partir de la ponderación de antecedentes: geológicos, geomorfológicos, sísmicos y de daños en la zona por eventos sísmicos indiferenciados.
- Aplicación de la metodología a un caso de estudio en la ciudad de Viña del Mar producto de la existencia de la falla Marga-Marga.
- Recopilación de antecedentes geológicos, geomorfológicos, evidencias de terreno y posible actividad reciente de la falla Marga-Marga.
- Recopilación de antecedentes de daño últimos de los últimos terremotos históricos y posible deformación en superficie.
- Validación y discusión de resultados.



## CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO DEL ESTUDIO

### 2.1 DEFINICIONES RELEVANTES

El planeta tierra es un sistema dinámico en permanente cambio debido a una serie de procesos de variado origen, los cuales se generan tanto en su interior como en superficie. Algunos de estos cambios son repentinos y violentos (como un terremoto o la erupción de un volcán) y recuerdan que la tierra está viva. Pero también el hombre es testigo de cambios lentos que pocas veces se perciben y que paulatinamente van modelando nuestro entorno, y que también pueden ser fuente de amenazas.

La ocurrencia de eventos asociados tanto a procesos endógenos como a procesos exógenos en el planeta, en muchas ocasiones genera daño y devastación en poblaciones. Dentro de este contexto, se fijarán algunos términos y definiciones que permitirán entender el desarrollo de las distintas etapas del estudio.

A medida que el hombre ha desarrollado estudios de identificación de las distintas amenazas, independiente de su origen, y de las posibles consecuencias que generan en la población, se hace necesaria la unificación de términos. En este mismo contexto, González de Vallejo et al. (2002) define como **riesgo** al conjunto de amenazas potenciales que pueden generar daño a personas y sus bienes (en este caso asociados a causas de origen geológico). Esta definición, por una parte hace referencia al fenómeno propiamente tal (estudio de la *amenaza potencial*), y por otra, al nivel de *daño* que puede generar.

En el estudio de la *amenaza potencial*, resulta fundamental determinar el **peligro o peligrosidad**, y está directamente relacionado con determinar la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno en un área y tiempo determinado (González de Vallejo et al., 2002). Específicamente, determinar el tipo de fenómeno, área que abarcará, probabilidad de ocurrencia, período de retorno, magnitud, velocidad, capacidad de control y predicción, entre otros aspectos resulta fundamental para cuantificar las amenazas que pueden afectar un sector, y que en general es abordado por profesionales ligados a las ciencias de la tierra (geólogos, geógrafos físicos, geofísicos e ingenieros geólogos).

La otra arista en la definición de Riesgo, es la referida al *daño* que se generará ante la ocurrencia de algún fenómeno. En este caso, se considera el grado de pérdidas y el nivel de preparación que presentan los asentamientos (ubicación, número y tipo de habitantes, calidad de las edificaciones, capacidad de respuesta de la población, entre otros) y se conoce como **vulnerabilidad** (UNDRO 1979, en Guía Análisis de Riesgos Naturales para el Ordenamiento Territorial, SUBDERE 2011). Según la Organización de Naciones Unidas (ONU), la vulnerabilidad se estima como la capacidad de respuesta de las construcciones humanas a la activación de una amenaza o bien, se puede estimar el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos como consecuencia de un fenómeno de intensidad determinada.

Sin embargo, determinar la vulnerabilidad resulta un tema muy complejo, dado que abarca aspectos no sólo del medio construido, si no que aspectos sociales, económicos, ideológicos, territoriales, políticos, entre otros, por lo que generalmente es

un tema estudiado por profesionales de áreas ligados a temas más humanos y antrópicos, como geógrafos, arquitectos y sociólogos, quedando fuera del alcance la presente Tesis de Magíster en un área específica de las ciencias de la tierra.

Para dirigir el estudio con un enfoque orientado a identificar zonas sensibles a la ocurrencia de amenazas es necesario incluir el concepto de **susceptibilidad**, que dice relación con la posibilidad que una zona se vea afectada por un determinado proceso expresada en grados cualitativos y relativos (González de Vallejo et al., 2002), y que dependerá de los factores que controlan o condicionan la ocurrencia de los procesos (que pueden ser intrínsecos a los propios materiales geológicos o externos).

La susceptibilidad se puede estimar considerando el inventario de los fenómenos registrados en una zona y la superposición de los factores que los condicionan, no considerando la variable temporal ni el cálculo de la probabilidad de ocurrencia, sino que mediante una sumatoria de factores favorables a la generación del fenómeno (González de Vallejo et al., 2002).

Además, dentro de los procesos que generan peligros geológicos, sólo algunos son controlables a escala humana mediante el desarrollo de obras a escala de ingeniería, y se denominan “peligros geotécnicos o peligros a escala de obras de ingeniería” (González de Vallejo et al., 2002). Para entender las diferencias fundamentales entre los peligros geológicos y geotécnicos, se debe entender primero las diferencias entre el medio geológico y el medio antrópico. El medio geológico estudia los fenómenos físicos de la tierra, mientras que el medio antrópico está asociado a la construcción de obras, infraestructura y ciudades. Las diferencias entre ambos se basan principalmente en la escala de trabajo, la temporalidad y lenguaje utilizado (González de Vallejo et al., 2002).

Dentro de la planificación del territorio y diseño de cualquier obra de ingeniería existen criterios de incorporación de los distintos tipos de peligros (geológicos y geotécnicos) en función del uso de las infraestructuras. Los primeros son incorporados mediante la estimación de un período de retorno (T) y que corresponde al tiempo (en años) que transcurre entre un evento y otro de magnitudes y área similar, mientras que en los peligros geotécnicos o peligros a escala de ingeniería, que suelen ser más frecuentes, se utilizan criterios de seguridad y aceptabilidad que estarán regidos por normativas y estándares definidos en función del proyecto (como por ejemplo factores de seguridad y probabilidad de falla) y que están relacionado con el uso de la infraestructura (González de Vallejo, et al., 2002).

El presente trabajo está orientado a determinar susceptibilidad de áreas urbanas, por lo que las amenazas consideradas son aquéllas que se manifiesten a escala de obras de ingeniería y en algunos casos en las cuales exista posibilidad de actuar sobre el proceso.

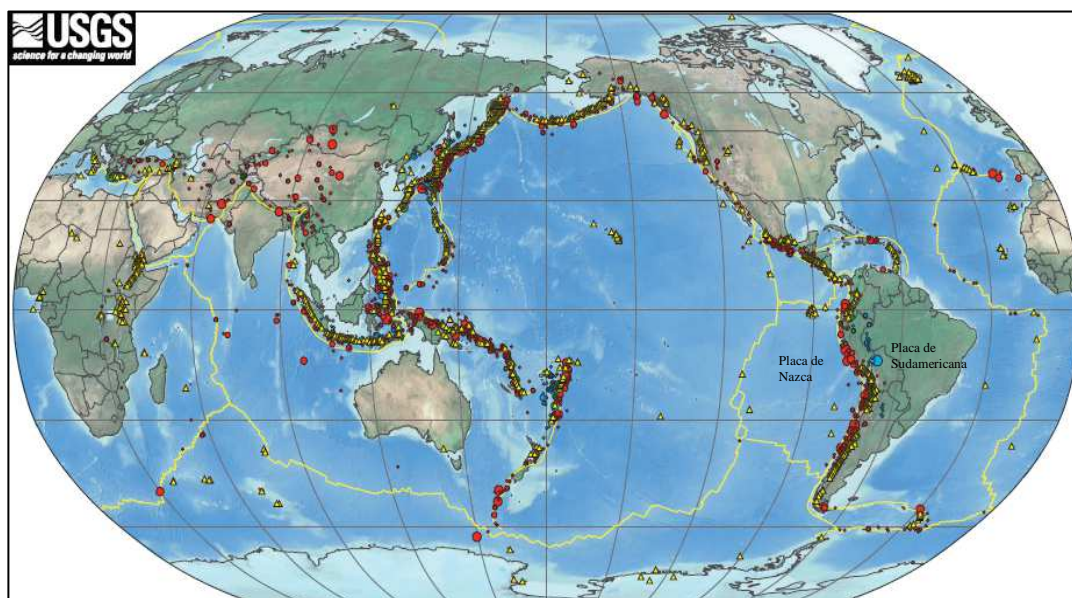
## 2.2 AMENAZAS CONSIDERADAS EN ESTE ESTUDIO

Si bien existen variados procesos geológicos que representan una amenaza, tanto de origen endógeno como exógeno (como por ejemplo volcanismo, sismos, tsunamis, remociones en masa, entre otros) sólo algunos de ellos son considerados peligros a

escala de obras de ingeniería en los cuales es factible minimizar las consecuencias a través de medidas introducidas por el hombre. Como ejemplo, por simple que parezca, no se podría colocar un tapón en un volcán para impedir su proceso eruptivo. Sin embargo, sí es posible desarrollar obras de contención que permitan evitar las caídas de rocas a un camino. A continuación se describen los tipos de amenazas consideradas en este estudio.

## 2.2.1 SISMOS

El movimiento de placas tectónicas es la responsable de la gran mayoría de sismos en el planeta (Leyton et al., 2010), y corresponden a una ruptura violenta generada por la acumulación y posterior liberación de energía acumulada por el movimiento de placas tectónicas, superando la resistencia de las rocas. Como se muestra en la Figura 2.1, se puede destacar la relación que existe entre algunos límites de placas tectónicas y la sismicidad histórica en la tierra (entre 1900 y 2010. Fuente USGS). Particularmente de la figura se puede observar que el borde occidental de Sudamérica se caracteriza por una banda de sismicidad activa angosta, entre 100 y 150 kilómetros.



**Figura 2.1. Sismicidad histórica en la tierra entre 1900 y 2010.**

**Fuente: National Earthquake Information Center – NEIC from USGS.**

La subducción de la Placa de Nazca bajo la placa Sudamericana ocurre según un plano inclinado hacia el este con buzamientos que varían entre los 15° y 30° respecto a la horizontal con un fuerte grado de acoplamiento (Madariaga, 1998) denominado zona o plano de Wadati - Benioff. La velocidad relativa de subducción entre ambas placas está entre 6 a 7 cm/año<sup>1</sup> (según Khazaradze y Klotz, 2003) lo que es una alta velocidad de convergencia y permite una rápida acumulación de esfuerzos consecuencia del contacto dinámico de estas placas dando lugar a la alta sismicidad que caracteriza a Chile y Perú (Ruiz y Saragoni, 2005). El empuje de la placa de Nazca en dirección al este se vería favorecida por su composición y edad (placa oceánica, de 35 millones de

<sup>1</sup> Velocidad variable según distintos autores. 6.6 cm/año (Kendrick et al., 2003); 8.4 cm/año (DeMets et al., 1990); 8 cm/año (DeMets et al., 1994).

años en la zona central), siendo comparativamente más densa que la placa continental, por lo que tendería a introducirse por debajo la corteza continental menos densa de la placa Sudamericana.

Por otra parte, el ángulo de subducción de la placa de Nazca no sería único en el margen Pacífico de Chile. Barazangi e Isacks, 1976 (en Madariaga, 1998) demostraron que la zona de subducción de Nazca se divide en cinco segmentos de norte a sur, de longitud variable, y que poseerían ángulos de subducción muy diferentes. Entre los 15° y 27° de lat. Sur, el ángulo de subducción oscilaría entre los 25° y 30° de inclinación (Norte Grande de Chile), mientras que los 27° y 33° lat. Sur, la Placa de Nazca descendería con un ángulo de 12° a 18° aproximadamente. En la zona de los valles transversales, entre los 26° y 33° lat. Sur, la placa de Nazca parece pegarse bajo el continente sudamericano y descendería bajo la Cordillera de los Andes y Argentina con un ángulo de solo unos 10°. Finalmente, en la región del Valle Central, a partir de 33° lat. Sur, el ángulo nuevamente estaría cercano a los 30° de inclinación.

Perfiles transversales al margen de Chile (disponibles en el Centro Sismológico Nacional, [www.sismologia.cl](http://www.sismologia.cl)), permiten observar que la sismicidad se concentra principalmente entre los 5 y 200 kilómetros de profundidad (en la zona de Wadati - Benioff), lo que además permite deducir el ángulo de subducción en las distintas zonas. La liberación de tensiones y deformaciones a lo largo del plano de Benioff, generan lo que se conocen como **sismos interplaca** (Madariaga, 1998) o sismos en la zona de Wadati - Benioff (tipo B de Figura 2.2), y serían los más comunes en Chile. El mecanismo de generación de este tipo de sismos, estaría asociado a las rugosidades que existen en ambos materiales generan zonas “trabadas o enganchadas”, las cuales se ven superadas por las resistencias de los materiales a deformaciones liberando energía (destrabándose). Este tipo de sismos se reconocen desde la fosa hasta unos 50 a 60 kilómetros de profundidad (Tichelaar y Ruff, 1993, en Leyton et al., 2010; Belmonte-Pool, 1997).

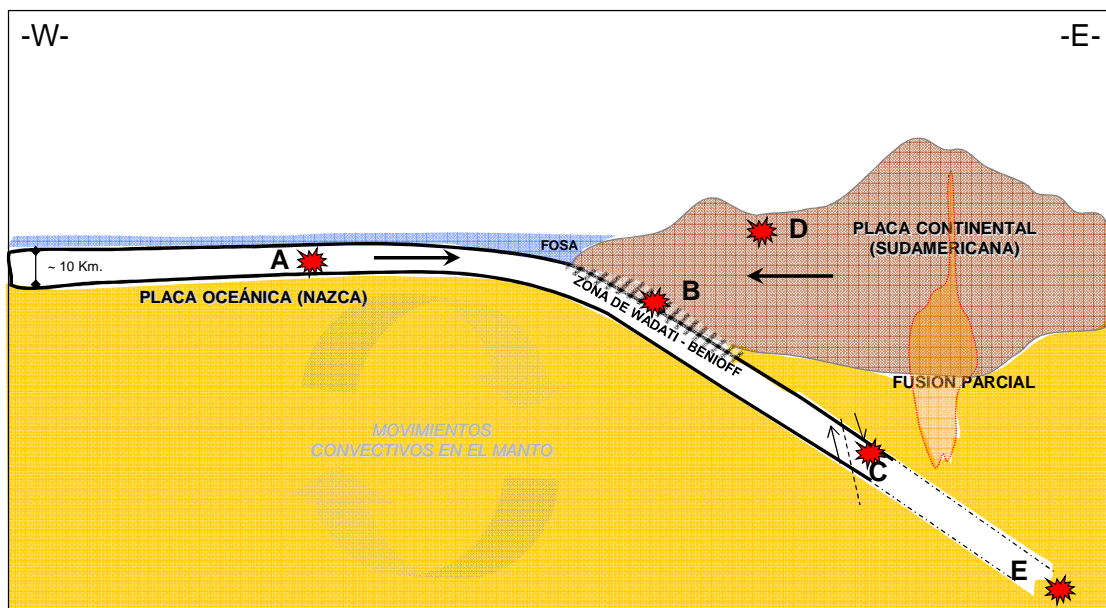


Figura 2.2. Esquema de subducción de Chile mostrando fuentes sismogénicas  
Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, la sismicidad en el margen de Chile no sólo existe en el contacto entre ambas placas tectónicas. Debido a los esfuerzos a que están sometidas la placas de Nazca y Sudamericana producto del movimiento convergente, también existen sismos en el interior mismo de las placas conocidos como **sismos intraplaca** (tipo A, C, D y E de Figura 2.2).

Los mecanismos de liberación de energía en los distintos tipos de sismos son complejos. En el caso de los sismos tipo A (sismos intraplaca oceánica), los materiales de la placa de Nazca (más jóvenes) se flexionan y doblan previamente al proceso de subducción, lo que genera campos extensionales (de estiramiento) los cuales reaccionan producto del choque de las placas, generando reacciones de liberación de energía de tipo “carga – descarga”. Esta fuente sismogénica también es conocida como “outer rise” pues ocurren a distancias mayores a 150 kilómetros de la costa (Leyton et al., 2010).

En el caso de los **sismos intraplaca** tipo C (también denominados sismos de profundidades intermedias) el mecanismo tiende a ser de tipo fracturamiento (en general tensional y en algunos casos compresional) debido a la flexión de la placa subductante. En otras palabras, se dobla y quiebra por su propio peso (ver Figura 2.2). Esta actividad sísmica se ha observado desde los 50 kilómetros hasta los 200 kilómetros de profundidad (Leyton et al., 2010), existiendo también registros de sismos intraplaca profundos (tipo E) en la zona norte del Chile (alrededor de los 22° Lat. Sur), entre 500 y 600 km de profundidad bajo la Argentina (Madariaga, 1998).

La sismicidad en la parte superior de la placa Sudamericana a baja profundidad (menos de 30 kilómetros) se conoce como **sismos corticales** (tipo D de Figura 2.2). Estos sismos serían producto del esfuerzo inducido por la subducción, que a la vez contribuye a la generación de relieve (es decir, la placa continental, más antigua se deforma producto de las presiones que ejerce la placa oceánica). Esta acumulación de energía se libera en general asociada a fallas superficiales que pueden tener movimientos normales, inversos y de rumbo, que responden a campos de esfuerzos compresivos o extensivos.

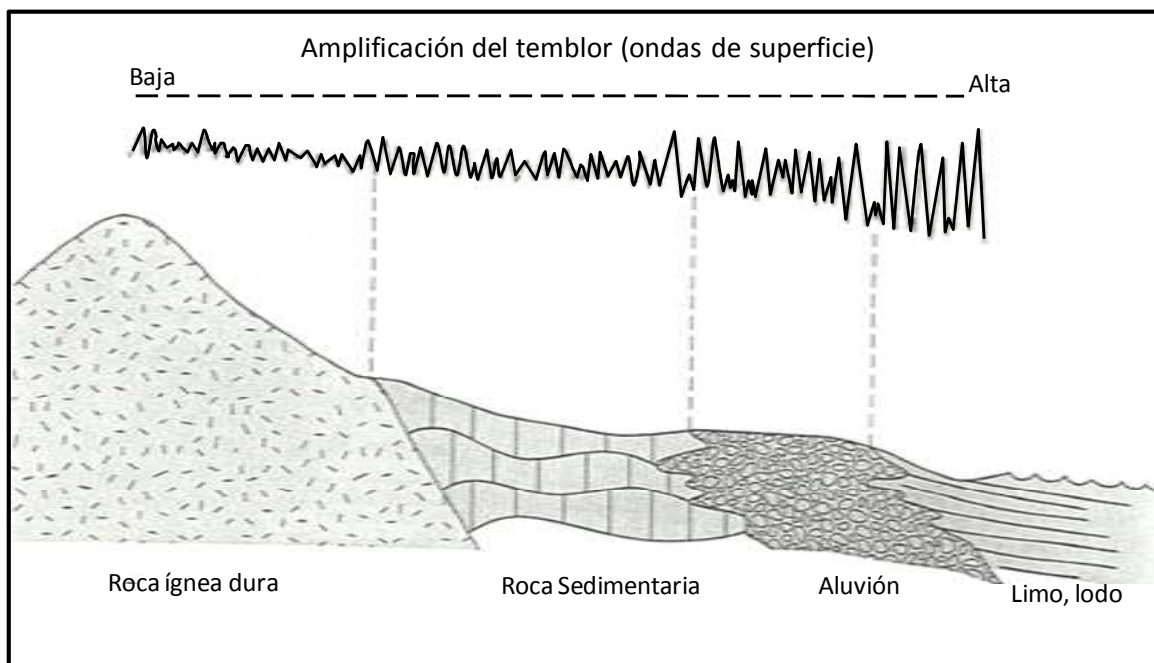
Para el estudio de los sismos como un tipo de peligro de origen geológico, es necesario considerar por un lado aspectos relacionados con el fenómeno propiamente tal así como sus efectos secundarios. Dentro de los parámetros propios del sismo, se considera su *magnitud* (relacionada con el tamaño del sismo), el *largo de la zona de ruptura* (entendida como el área que abarca la zona en que la placa se rompe), el *período de retorno* (años que transcurren entre dos eventos de similares características en un área determinada), *aceleraciones máximas* alcanzadas y la *intensidad* de un sismo, que corresponde a una escala cualitativa que describe la percepción subjetiva de las personas ante un sismo en un lugar específico y dependerá de los tipos de suelos y daños registrados.

Se sabe además, que la naturaleza de los materiales locales y la estructura geológica influyen en gran medida en el movimiento del suelo durante un sismo (Keller et al., 2004). Se ha observado que las condiciones locales, como tipo de suelos, topografía, profundidad del nivel freático, entre otras, pueden suponer respuestas sísmicas

diferentes dentro de un entorno geográfico considerado (González de Vallejo et al., 2002) y se denomina “efecto de sitio” o “efectos locales”. De esta forma, para un mismo terremoto y dependiendo del tipo de terreno donde se encuentra ubicado el observador, las ondas sísmicas pueden amplificarse durante el desarrollo del terremoto generándose más daño en algunos sectores que en otros.

En términos constructivos y de respuesta de los suelos ante sismos, existen distintas clasificaciones de la calidad del subsuelo de cimentación para la construcción de edificaciones. Por ejemplo, la propuesta por las disposiciones de *National Earthquake Hazards Reduction Program NEHRP* (en Roldán et al., 2002), que se basa en una clasificación geológica estandarizada del lugar mediante la medición de la velocidad media de las ondas de corte de los 30 metros superiores de la geología, o la indicada en la Norma Chilena de diseño sísmico de edificios (NCh433 Of 96 y su modificación D.S. 61) en la que categoriza los suelos según 5 tipos según parámetros que dependen de sus características geotécnicas y propiedades dinámicas.

No obstante lo anterior, en términos geológicos es posible hacer una diferenciación general de los suelos de fundación basada en su nivel de compactación y nivel de consolidación (Keller et al., 2004), pudiendo hacerse una relación general con algunos materiales geológicos (Figura 2.3).



**Figura 2.3. Relación general entre el material del sustrato y la amplificación de la vibración durante un terremoto**  
Fuente: Keller and Blodgett 2004.

Dentro de los efectos que pueden generar los sismos, está la rotura de la superficie del terreno por desplazamientos de fallas activas (González de Vallejo et al., 2002) o deformaciones superficiales inducidas por fallas inactivas que generarán un comportamiento distinto en la zona por la cual atraviesan (Galdames y Saragoni, 2002).

Estos potenciales efectos no deben confundirse con el estudio de la peligrosidad sísmica que puede presentar una falla activa (asociada a sismicidad cortical), y que se estudia siguiendo las etapas típicas de un estudio de peligro sísmico (evaluando la sismicidad histórica, determinando la productividad sísmica de la falla, y estimando magnitudes máximas).

Según las actuales leyes en Chile, un estudio de amenazas naturales debe incluir a las fallas geológicas. Según lo indicado en la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción (OGUC), en su apartado 2.1.17 “Disposiciones complementarias” (modificación publicada en D.O. 13.04.11) se define como áreas de riesgo aquellos territorios en los cuales, previo estudio fundado, se limite determinado tipo de construcciones por razones de seguridad contra desastres naturales u otros semejantes, dentro de los cuales se incluyen zonas con peligro de ser afectadas por “fallas geológicas”, no especificándose de qué forma deben ser consideradas. En Chile existen estudios que abordan casos de fallas geológicas que atraviesan ciudades, como por ejemplo la ciudad de Concepción (Galli, 1967; Quezada, 1996), falla San Ramón en el sector oriente de Santiago (Vargas et al., 2012), en Antofagasta (Delouis et al., 1997) o la falla Marga-Marga en Viña del Mar (Thorson, 1999; Ruiz y Saragoni, 2002; Muñoz et al., 2012), con distintos enfoques.

#### 2.2.2 REMOCIONES EN MASA

En la superficie del planeta, existen procesos controlados por agentes externos y que generan desagregación y desintegración de los materiales, junto a una disminución de su resistencia, lo que en muchas ocasiones favorece la ocurrencia de fenómenos en la que se ve involucrada la movilización de materiales. En la actualidad, el hombre favorece y acelera muchos de estos procesos, mediante deforestación, incorporación de agentes contaminantes al medio ambiente (CO<sub>2</sub>, cambio en condiciones química de las aguas, etc.) y modificación de paisajes para sus edificaciones y proyectos (cortes, terraplenes, otros).

A partir de los distintos procesos geológicos y climáticos que modelan la superficie de la tierra, las laderas tienden, por lo general, a adoptar geometrías naturales cercanas al equilibrio dado por el ángulo de reposo natural de los materiales que los componen y estructuras geológicas que los atraviesan. El cambio en estas condiciones naturales, ya sea por causas antrópicas o en forma natural, generará áreas sensibles a sufrir desestabilización. Para que se den nuevas condiciones de equilibrio, es posible que ocurran movimientos de laderas que permitan alcanzar condiciones de equilibrio o bien, se requirieran medidas de estabilización introducidas por el hombre.

Los procesos que involucran la movilización de materiales (suelo, rocas o ambos) por efectos de la gravedad se denominan genéricamente **remociones en masa** (Cruden, 1991) y constituyen un conjunto de amenazas tanto a escala geológica como a escala de obras de ingeniería, que resultan ser frecuentes en la naturaleza y que en algunas ocasiones generan gran daño a la población. El término remoción en masa, por lo general se refiere a movimientos de laderas que ocurren pendiente abajo de un determinado volumen de material, en los cuales el factor gravedad está siempre presente, por lo que también se conocen como procesos gravitacionales.

## 2.2.2.1 CLASIFICACIÓN DE REMOCIONES EN MASA

La clasificación de los distintos fenómenos de remoción en masa se basa por un lado en el tipo de movimiento que presentan, y por otro lado, en la naturaleza de los materiales involucrados (Varnes, 1978 en Tabla 2.1). Los movimientos más frecuentes son de tipo deslizamientos (superficiales y profundos), desprendimientos, volcamientos, mecanismos tipo flujo y extensiones laterales. Mientras que la naturaleza de los materiales afectados puede ser muy variable entre rocas y suelo o combinación de ambos, incluyendo en ocasiones fragmentos material orgánico, troncos de árboles e incluso escombros y basura.

Dentro de la características de cada tipo de remoción en masa, es importante considerar si presentan o no control de estructuras geológicas, el mecanismo de falla que predomina y las velocidades a las que ocurren. Existen remociones en masa extremadamente rápidas (5 m/s según la clasificación de Cruden y Varnes, 1996), como por ejemplo caídas de rocas, hasta movimientos extremadamente lentos (velocidad típica de 16 mm/año según la clasificación de Cruden y Varnes, 1996), como por ejemplo fenómenos de reptación.

**Tabla 2.1**  
**Clasificación de Remociones en Masa según Varnes (1978)**

Tipo de movimiento		Tipo de material		
Caída		Roca	Suelo	
Toppling (volcamiento)				
Deslizamiento	Rotacional		Grano Grueso (detritos, <80% pátículas <2mm)	Grano fino (barro, >80% pátículas <2mm)
	Traslacional			
Extensiones laterales				
Flujos				
Complejos				

La velocidad de una remoción en masa junto al volumen del material movilizado, condicionan en gran medida la capacidad de control que existe sobre el proceso mediante obras de contención o medidas de mitigación.

Dentro de las remociones en masa más comunes, se considerarán para este trabajo los desprendimientos de material (como caídas de rocas, suelos o mezclas incluyendo en algunos casos vegetación), los deslizamientos (ya sea de roca o material disgregado) y los de tipo flujo (barro, detritos u otro). Ver Figura 2.4.

Las caídas o desprendimientos de bloques de roca o masas de roca son eventos muy rápidos (González de Vallejo et al., 2002) en los cuales el material movilizado se separa del macizo rocoso que lo contiene, viéndose favorecidos por la existencia de planos de debilidad y por laderas con geometrías irregulares. El material desprendido podrá alcanzar el pie del talud mediante caída libre (tipo (a1) y (a3) de Figura 2.4), ruedo y rebote (tipo (a2) de Figura 2.4) o una combinación de ellas.



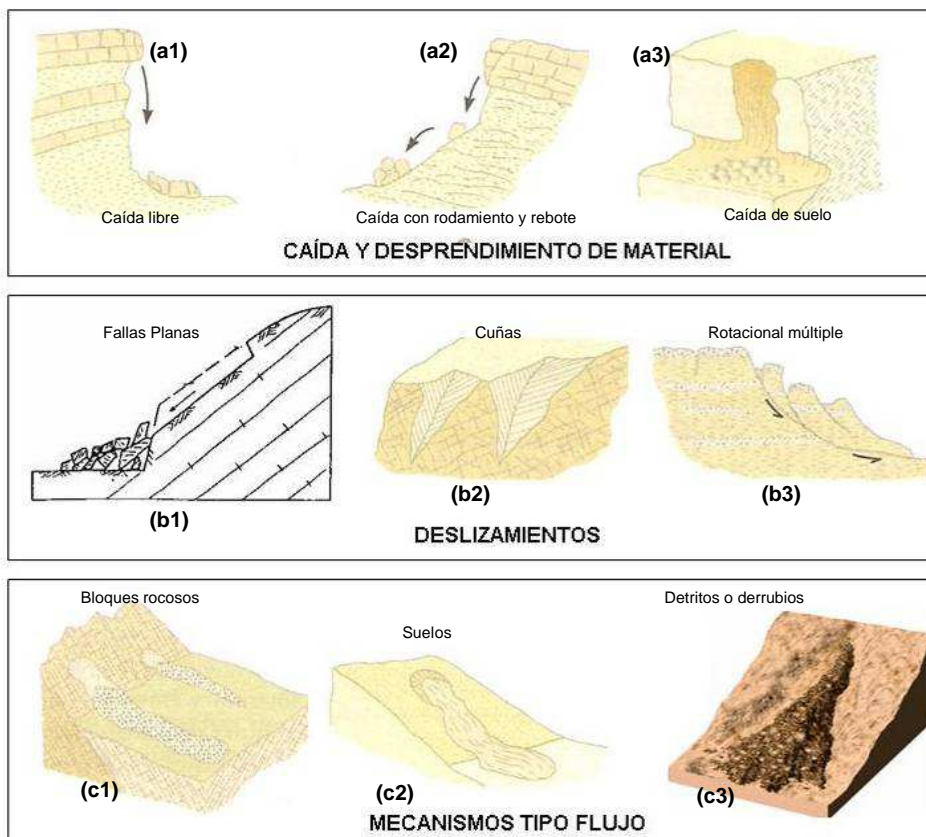
La trayectoria del material, dependerá principalmente de la forma del bloque y del ángulo de pendiente del talud (Lara, 2007). Según Hoek & Bray (1981) el comportamiento de la trayectoria en caídas de roca puede ser explicado mediante principios físicos básicos que incluyen el rebote y el rodamiento de masas rocosas, siendo el ángulo de la ladera y el ángulo de fricción los factores principales. Los modelos matemáticos que se utilizan para analizar estos fenómenos, consideran los mecanismos más comunes (que son rodamientos y rebote de los bloques) y en ambos casos se incluye el principio de caída libre. Para mayor detalle de las ecuaciones que gobiernan ambos movimientos, se sugiere revisar Lara (2007).

Los deslizamientos corresponden a movimientos de masas ladera abajo que ocurren a través de una o más superficies de cizalle predefinidas, ya sean discontinuidades del macizo rocoso o a partir de las condiciones de resistencia de los suelos que definirán su fallamiento, como por ejemplo mediante el criterio de falla de Mohr-Coulomb (Lara, 2007). Los movimientos más comunes que presentan los deslizamientos, son de tipo traslacionales y rotacionales (Varnes, 1978). Los primeros, tienen lugar en superficies preexistentes más o menos planas, generadas por discontinuidades presentes en el macizo rocoso (por ejemplo diaclasas, fallas o planos de estratificación), y donde la masa a deslizar supera la resistencia que le ocasiona la discontinuidad mediante características propias de la estructura, como propiedades mecánicas resistentes de la superficie y del relleno (González de Vallejo et al., 2002). Dentro de los mecanismos más comunes asociados a deslizamientos traslacionales de bloques rígidos (roca o suelo duro) se reconocen deslizamientos tipo cuña y falla plana (ver Figura 2.4 – casos b1 y b2). En el caso de los deslizamientos de tipo rotacionales (b3 de Figura 2.4), la superficie de rotura (que puede ser superficial, profunda, única o múltiples) queda definida por superficies curvas y cóncavas (González de Vallejo et al., 2002) y son frecuentes en materiales homogéneos y de baja calidad geotécnica (como arenas o suelos) o rellenos artificiales (botaderos de material estéril y lastre en minería, rípios de lixiviación).

Otro tipo de mecanismo frecuente son los flujos (tipo c de Figura 2.4), y que corresponden a movimientos continuos en el espacio, donde las superficies de ruptura no son preservadas y las masas desplazadas son fuertemente deformadas internamente, comportándose de manera similar a un líquido viscoso de material saturado en agua (Varnes, 1978). Existen distintas clasificaciones para los flujos, basadas por un lado en el tipo de material movilizado (barro, detritos o fragmentos rocosos) y en la proporción de líquido y sólido que presenten. Su ocurrencia dependerá de la disponibilidad de material (generalmente disgregado) que pueda ser arrastrado ladera abajo por la acción de agua, lo que hace que se mecánicamente como un fluido no newtoniano. La movilización de esta masa requiere inicialmente de la pérdida de la resistencia del material y aumento de los esfuerzos de corte actuantes sobre ésta, mientras que la condición de flujo está dada por la reducción de la viscosidad (Lara, 2007). En general estos mecanismos son poco profundos en comparación con el área que pueden abarcar, y pueden tener lugar en laderas con pendientes incluso menores a 10° (González de Vallejo et al., 2002). Varnes (1978) clasifica los flujos de acuerdo a características de tasa de movimiento y tipo de material involucrado, mientras que Hungr et al. (2001), en Lara (2007) presenta una clasificación más completa de flujos, donde considera el material según su granulometría, las velocidades de desplazamiento y su contenido de agua. Su transporte tiende en un principio a ser dominado por las

altas pendientes y luego a canalizarse por cauces preexistentes, mediante el cual el fluido va perdiendo velocidad a medida que avanza por sobre la topografía, hasta que el ángulo de fricción interna del material es mayor o igual al de la pendiente (Selby, 1993).

Vale la pena señalar que pueden existir otras sub clasificaciones de remociones en masa que dependerán tanto del tipo de material afectado, tipo de movimiento, velocidad que alcanzan y geometría del depósito.



**Figura 2.4. Algunos tipos de remociones en masa**  
**Fuente: Modificado de González de Vallejo et al. (2002)**

#### 2.2.2.2 FACTORES CONDICIONANTES Y DESENCADENANTES DE REMOCIONES EN MASA

De los procesos mencionados, cada uno presenta características propias en términos de material afectado y mecanismos de movilización. Sin embargo, existen factores relacionados con la naturaleza, estructura y composición del terreno que favorecen condiciones para que se generen procesos de remociones en masa (González de Vallejo et al., 2002). En otras palabras, condicionan la existencia de áreas sensibles o susceptibles a la ocurrencia de un proceso. Estos factores, conocidos como **factores condicionantes** están relacionados a las características del medio físico, como por ejemplo pendientes y topografía abrupta de un terreno, tipo y calidad de los materiales, presencia o ausencia de vegetación, presencia de agua, existencia de intervención antrópica, entre otros (González de Vallejo et al., 2002). De la misma forma, existen factores que modifican la estabilidad preexistente del terreno, como construcciones,

caminos, cortes, sismos y lluvias intensas, que desencadenan o gatillan la ocurrencia de un evento (González de Vallejo et al., 2002) y son conocidos como **factores desencadenantes**.

Dentro de los factores condicionantes más comunes para distintos tipos de remociones en masa (Hauser, 1993; González de Vallejo et al., 2002; Lara, 2007), se consideran para este trabajo los siguientes:

- **Geología y geotecnia.** Las características geológicas de un sector, son usualmente descritas a partir de los distintos tipos de materiales presentes (distintas litologías, sedimentos y coberturas de suelo), como por la disposición que presentan (estratificación, contactos, presencia de fallas y sistemas de diaclasas). Sin embargo, para estudiar las remociones en masa no sólo es importante conocer la composición y tipo de masa sensible a ser movilizadas, sino que también como se espera que se comporte en términos mecánicos y resistentes. Es importante considerar el grado de alteración y meteorización de los macizos rocosos, así como caracterizar su fábrica estructural (tipo, disposición y condición de las discontinuidades), además de obtener valores de su resistencia, tanto de la roca intacta, del macizo como de sus discontinuidades, además de parámetros como la permeabilidad, humedad, densidad de los materiales que lo componen.
- **Geomorfología.** Las condiciones geomorfológicas de un área estarán gobernadas por los distintos procesos que modelan la superficie, y pueden ser descritas en términos de rangos de pendientes, topografía presente, a altura de las laderas y la forma que presentan (laderas regulares o irregulares, con pendiente positiva o negativa). De esta forma, topografías escarpadas, con altas pendientes, propiciarán la generación de varios tipos de remociones en masa (como flujos, deslizamientos y caídas), favoreciendo la acción gravitatoria. Los rangos críticos de pendientes para cada tipo de remoción en masa son variables. Hauser (1993) señala que pendientes mayores a  $25^\circ$  en las cabeceras de las hoyas hidrográficas serían favorables para el desarrollo de flujos o aluviones, mientras que Sauret (1987) en Sepúlveda (1998) señala que aluviones podrían generarse en pendientes menores (que no sobrepasan los  $15^\circ$ ). Laderas en roca con pendientes mayores a  $35^\circ$  serían susceptibles a que se generen deslizamientos, y en un caso sísmico, está pendiente podría ser sólo mayor que  $15^\circ$  (Keefer, 1984). En el caso de caídas de rocas, podrían generarse ante un sismo a partir de un macizo rocoso fracturado, meteorizado, y poco resistentes, en zonas donde los taludes son mayores o iguales a  $40^\circ$  (Keefer, 1984). En algunos tipos de remoción en masa, donde es relevante el espesor de suelo y cobertura vegetal, se consideran además aspectos geográficos del área, como por ejemplo orientación con respecto al norte lo que puede finalmente influir por ejemplo en el grado de humedad de la ladera y exposición al sol.
- **Clima y vegetación.** Las condiciones climáticas influyen directamente en el grado de meteorización y erosión que tendrá un área, especialmente al verse expuesta a precipitaciones, viento, cambios de temperatura y radiación solar. Por ejemplo, la meteorización física y química de los materiales (que es más intensa en climas húmedos), genera mayores espesores de suelo y horizontes orgánicos, y traerá como consecuencia la pérdida de resistencia de los materiales. No obstante, un

clima húmedo propiciará la presencia de cobertura vegetal, que además de reducir la erosión, puede en algunos casos ser una barrera natural de contención de material movilizado por remociones en masa. Otro ejemplo es el caso de las precipitaciones, que pueden ser incluidas como condicionantes dentro de la variable climática, pero que también actúan como desencadenante de algunos procesos. Para evaluar cómo el clima y la vegetación condicionan la ocurrencia de remociones en masa, se hace necesario además conocer las características particulares del área a evaluar y los fenómenos asociados.

- **Condiciones hidrológicas e hidrogeológicas.** El agua, tanto en superficie como por debajo de ella, condiciona en forma directa e indirecta la generación de remociones. La forma y distribución de sistemas de drenaje en superficie, así características de caudales, escorrentías, infiltración y posición del nivel freático, además de propiedades de permeabilidad y porosidad de las unidades, influyen en la incorporación de agua en suelos y macizos rocosos (Lara, 2007). El agua juega un papel negativo en la resistencia de los materiales, ya que por un lado, genera presiones intersticiales lo que reduce la resistencia, aumenta los esfuerzos de corte por el incremento del peso del terreno y genera fuerzas desestabilizadoras en grietas y discontinuidades (González de Vallejo et al., 2002) y reduce la resistencia al corte de discontinuidades al lavar los rellenos de estas.
- **Intervención antrópica.** El hombre genera de forma planificada o no, modificaciones en el medio. La generación de obras constructivas, cortes, terraplenes, plataformas, obras de minería, etc., en muchas ocasiones deja las laderas más susceptibles a la ocurrencia de eventos producto de diseños mal concebidos, con ángulos mayores a los que es capaz de resistir en forma natural los materiales, o que no consideran el control estructural que tendrá un talud de forma natural. En algunas ocasiones, el resultado son geometrías de laderas irregulares o con pendientes negativas que finalmente causarán desestabilización. Sin embargo, también existen obras antrópicas robustas, que disminuirán la susceptibilidad ante remociones en masa, y esa consideración será incluida y abordada en el presente trabajo. Cabe señalar, que al igual que las precipitaciones, la intervención antrópica en algunos casos resulta el agente desencadenante de un evento.

A diferencia de los factores condicionantes, los factores desencadenantes corresponden a agentes activos y pueden ser considerados como factores externos que provocan o gatillan inestabilidades (González de Vallejo et al., 2002). En la mayoría de los casos, son varias causas las que finalmente contribuyen al movimiento de una ladera, aunque con frecuencia se atribuyen a sismos o precipitaciones intensas, sin embargo, deben existir las condiciones predeterminadas para su ocurrencia.

Dentro de los factores desencadenantes, los más comunes se mencionan:

- **Condiciones hidrológicas e hidrogeológicas.** Las precipitaciones y aportes de agua, así como el cambio en las condiciones hidrológicas en los terrenos, produce variación en las presiones intersticiales y en el peso del terreno, y cambios en los niveles de saturación de suelos, lo que favorece la pérdida de resistencia de los materiales, además de un aumento en la erosión de las laderas o en algunos casos,

socavamiento de terrenos. Según González de Vallejo et al. (2002), el desencadenamiento de remociones en masa por causas meteorológicas y climáticas está relacionado fundamentalmente con el volumen, intensidad y distribución de las precipitaciones, lo que implica considerar la respuesta del terreno ante lluvias intensas durante horas o días, su respuesta estacional y en ciclos de sequía. Las precipitaciones cortas e intensas serían más proclives a generar eventos superficiales, mientras que remociones más profundas serían provocadas por eventos distribuidos en largo periodo de tiempo (Aleotti, 2004 y Kim et al., 2004, en Lara, 2007).

La cantidad de lluvias necesarias para que se desencadenen remociones en masa, dependerá del tipo y condición de los terrenos y su ubicación geográfica. En general, distintas zonas necesitarán lluvias de intensidad y/o duración distinta para que se generen remociones, existiendo así un umbral de precipitaciones característico de cada lugar (Lara, 2007). Para determinar los umbrales característicos de cada zona, se quiere contar con bases de datos idealmente continuas de precipitaciones o con alta frecuencia que permitan la realización de análisis estadísticos para la zona de estudio (situación que no siempre ocurre) e incluir dentro del análisis la ocurrencia de fenómenos climáticos como por ejemplo el fenómeno de El Niño en el cual existe una tendencia al exceso de precipitaciones (inviernos con mayor días con lluvia y con precipitaciones de intensidades mayores) y de los niveles de caudales líquidos de escorrentía (García, 2000 en Lara, 2007).

Los cambios en el nivel del nivel freático como consecuencia de lluvias intensas, así como cambios en los niveles de permeabilidad en los terrenos (por ejemplo, por pavimentos y asfaltos) o intervenciones en laderas (por ejemplo rajos mineros) genera modificaciones en las presiones intersticiales (aumento o descenso) lo que se traduce en cambios en las propiedades geotécnicas de los materiales.

- **Sismos.** Los terremotos pueden provocar movimientos de todo tipo en las laderas (González de Vallejo et al., 2002), dependiendo de las características y de parámetros sísmicos (magnitud y distancia a la fuente). Las aceleraciones sísmicas generan un cambio temporal en el régimen de esfuerzos al que está sometido la ladera, tanto normales como de corte, pudiendo producir su inestabilidad (Lara 2007). Según González de Vallejo et al. (2002), los desprendimientos de bloques, deslizamientos, flujos y avalanchas de roca son las remociones en masa más frecuentes producto de un fenómeno sísmico, mientras Keefer (1984) señala que corresponderían a caídas de rocas, deslizamientos desagregados de suelos en laderas con pendientes mayores a 15° y deslizamientos de roca en laderas con pendientes mayores a 40°, y en forma secundaria, derrumbes en suelo, deslizamientos en bloques de suelo y avalanchas de tierra, estableciendo magnitudes mínimas aproximadas para la generación de cierto tipo de fenómenos de remociones en masa, en base a observaciones de eventos generados.

Por ejemplo, para sismos con magnitud menor o igual a 5,3 se establece en 50 kilómetros la máxima distancia desde el foco y zonas con ocurrencia de caídas de rocas y deslizamientos disgregados (Keefer, 1984). De la misma forma, se establece en 10 kilómetros la máxima distancia entre el foco de un sismo con magnitud cercana a 5,5 y zonas con flujos de detritos y deslizamientos masivos. Cabe señalar

que estas condiciones no contemplan amplificaciones locales o efectos de sitio que pudiese desencadenar remociones en masa.

- **Intervención antrópica.** El hombre, como ente modificador del medio, genera una serie de cambios que en algunos casos son el principal desencadenante de remociones en masa. Se mencionó anteriormente, que los cambios en las condiciones hidrológicas e hidrogeológicas producto de la impermeabilización artificial de los suelos o el desvío de cauces sin las correctas medidas paliativas, pueden generar cambios en las propiedades de los materiales y variaciones en el nivel freático. Por otro lado, la obstrucción de cauces con basura y escombros puede aumentar el material a movilizar durante un aluvión, o bien, la mala mantención de redes de alcantarillado y agua potable, pueden desencadenar aluviones. Se mencionan en este último como ejemplo el aluvión en el Cerro el Litre (Valparaíso) el año 2009 y el aluvión en el Cerro Ramaditas en Valparaíso en Julio del 2013, ambos desencadenados por la rotura de matrices de agua (fuente: información de prensa: El Mercurio de Valparaíso).

La generación de obras constructivas, cortes, terraplenes, plataformas, entre otros, sin un análisis geotécnico adecuado, puede ocasionar desestabilización, así como el poco mantenimiento de sistemas de contención, o bien la limpieza de laderas sin la guía de un especialista.

- **Actividad volcánica.** Las erupciones volcánicas pueden desencadenar remociones en masa, tales como deslizamiento, avalanchas y flujos de gran magnitud (denominados lahares), a causa del derretimiento de nieves en el entorno volcánico, y/o por la movilización de materiales depositados recientemente.

## **CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN MASA EN ÁREAS URBANAS.**

### **3.1 INTRODUCCIÓN**

Para evaluar la susceptibilidad de remociones en masa en áreas urbanas, se propone introducir ajustes a la metodología propuesta por Lara (2007), que permite determinar un índice de susceptibilidad basado en la suma de puntajes ponderados para distintos factores condicionantes de algunos tipos de fenómenos.

El trabajo propuesto por Lara (2007) considera la evaluación del peligro de remociones en masa y a grandes rasgos se puede dividir en dos partes: la evaluación de susceptibilidad y la evaluación del peligro para cada unidad. La primera etapa propone el cálculo de un índice de susceptibilidad mediante la ponderación de factores condicionantes (basado en Sepúlveda, 1998) para cuatro tipos de remociones en masa: deslizamientos en suelo y rocas, flujos y caídas de roca. Para cada tipo de fenómeno se definen los factores condicionantes importantes en función de su influencia en la ocurrencia de la remoción y se ponderan a partir de rangos propuestos en el estudio, obteniéndose un índice de susceptibilidad (IS) entre 0% y 100% para cada unidad de análisis. Las zonas críticas de generación de remociones en masa serán aquellas unidades con IS mayor a 50.

La metodología propuesta por Lara (2007) es de tipo mixta (cualitativa y cuantitativa), ya que por un lado define los factores condicionantes a partir de observaciones de terreno, pero se asigna un valor como ponderador para cada condicionante basado en casos anteriores, literatura y experiencia del profesional. Las etapas de estudio propuestas por Lara (2007) consideran una fase inicial de gabinete orientada a recopilar la información de la zona de análisis y definir la escala de trabajo, seguida de una etapa de terreno inicial orientada a caracterizar las unidades (de roca y suelo) presentes en la zona de estudio a partir de mapeo, observación y caracterización de los condicionantes del área, tales como geología, geomorfología, estructuras geológicas, condiciones hidrológicas e hidrogeológicas, características de la vegetación y clasificación geotécnica in-situ de suelos y rocas.

Lara (2007) propone que la determinación de susceptibilidad para los fenómenos definidos sea mediante la aplicación de tablas con factores condicionantes ponderados para distintas unidades de análisis, definidas en base a criterios geológicos – geomorfológicos, y presentadas en el Anexo A. La Tabla 3.1 muestra a modo de ejemplo la ponderación propuesta por Lara (2007) para caídas de rocas.

En la segunda parte del análisis propuesto por Lara (2007) se evalúa el peligro de aquellas unidades definidas como críticas ante la posible generación de remociones en masa ( $IS > 50$ ). Para ello, se plantea el desarrollo de una nueva etapa de terreno orientada a caracterizar geotécnicamente con mayor detalle las unidades críticas, mediante toma de muestras para ensayos de laboratorio o mapeo estructural en detalle cuando corresponda. Esta etapa tiene por objetivo final reunir la información que permita hacer los análisis de estabilidad de laderas mediante métodos específicos según el tipo de remoción utilizando software específicos (disponibles en el mercado) y análisis cinemáticos que permitan estimar peligro en la zona de estudio, basado en la

obtención de la probabilidad de ocurrencia del fenómeno y su alcance, incluyendo en algunos casos la probabilidad del agente gatillante del evento.

**Tabla 3.1**  
**Factores condicionantes y ponderación propuesta por Lara (2007) para caídas de rocas**

FACTOR	% máx.	DESGLOSE DE FACTORES	% máx.
GEOMORFOLOGIA (F1)	35	Pendiente Promedio de la unidad	15
		Altura máxima de la unidad	10
		Forma	10
GEOLOGÍA Y GEOTECNIA (F2)	20	Características Geológicas - Geotécnicas de la unidad	15
		Cercanía a una falla mayor y/o zona de cizalle	5
INTERVENCIÓN ANTRÓPICA (F3)	25	Presencia de Desestabilización/ Estabilización artificial. Se evalúa la condición de la unidad respecto al mecanismo analizado	25
ANTECEDENTES (F4)	10	Caídas de rocas reconocidas en la ladera	10
CLIMA Y VEGETACIÓN (F5)	10	Condición de Humedad en la ladera	5
		Presencia Vegetación	5

En términos de la escala de trabajo y dimensiones de área de análisis, Lara (2007) sugiere que la metodología sea aplicada en áreas no mayores a la de una hoya hidrográfica de decenas de km<sup>2</sup>, ajustándose a escalas entre 1:20.000 y 1:50.000.

A partir de un análisis de la metodología propuesta por Lara (2007) para evaluar susceptibilidad, y la validez de su aplicación en áreas urbanas, se observa por ejemplo, que dentro de los factores condicionantes considerados es necesario aumentar el desglose y la ponderación del factor intervención antrópico así como introducir ajustes en la escala de trabajo, a partir de lo cual se desarrollan las metodologías descritas a continuación.



## 3.2 METODOLOGÍA PROPUESTA

En el presente trabajo, se realizan ajustes e introducen modificaciones a la metodología propuesta por Lara (2007) para determinar índices de susceptibilidad de remociones en masa en áreas urbanas. El ajuste metodológico se realiza en paralelo a la aplicación en un caso piloto, lo que permite la calibración y análisis retrospectivo de los ajustes realizados. Finalmente, se proponen nuevas tablas que permitan determinar susceptibilidad de generación de remociones en masa a escala urbana a través de la ponderación de factores condicionantes.

Los tipos de remociones consideradas difieren en parte de la metodología original, la cual analiza deslizamientos de roca y suelos, caídas de roca y flujos. El presente estudio además de analizar caídas de roca, flujos y deslizamientos de suelo, diferencia deslizamientos traslacionales de rotacionales.

### 3.2.1 DEFINICIÓN DE UNIDADES DE ANÁLISIS Y ESCALA DE TRABAJO

Como la metodología está orientada a evaluar la generación de remociones en masa en laderas urbanas, se considera la división de los sectores de estudio en unidades de análisis basándose por un lado en rasgos geomorfológicos y geológicos – geotécnicos, y por otro lado, en criterios urbanos.

Con los primeros aspectos, se divide el sector en unidades con valores similares de pendiente, altura, orientación con respecto al sol u otra característica geomorfológica particular, considerando además parámetros geológicos – geotécnicos que agrupen unidades con un comportamiento geotécnico similar.

Como el área de trabajo estará dentro de zonas urbanas, es importante incluir en la definición de unidades criterios urbanos, como lo son límites entre sectores, ejes viales y calles, además de zonas intervenidas antrópicamente. Se debe considerar además la accesibilidad al menos a una parte de la zona de estudio, a fin de poder contar con datos de terreno y eventualmente realizar mediciones. Es frecuente que en zonas urbanas, existan zonas de acceso restringido, por tratarse de zonas militares o recintos privados.

El número de unidades a definir dependerá del tamaño de la o las zonas de estudio. Lara (2007) propone no definir más de 150 unidades, número que parece ser muy razonable, considerando además el mayor detalle que requiere un análisis en zonas urbanas. En este mismo sentido, para poder identificar aquellas áreas sensibles a la ocurrencia de remociones en masa que no están del todo identificadas en estudios comunales (Estudios Fundados de Riesgos para Planes Reguladores Comunales) y cuya ocurrencia puede ser a menor escala, pero con alto impacto en la dinámica de las ciudades, se sugiere una escala de trabajo entre 1:5.000 y 1:10.000.

### 3.2.2 FACTORES CONDICIONANTES CONSIDERADOS

La definición de los factores condicionantes dependerá en parte del tipo de remoción analizada y de la influencia que tendrá en su ocurrencia. En esta parte, se ajustaron algunos de los ponderadores generales propuestos por Lara (2007), en otros casos se

desglosaron con mayor detalle los condicionantes considerados, y también se incorporaron nuevos aspectos a evaluar. A continuación se presentan los Factores Condicionantes considerados en el presente trabajo y sus respectivos desgloses.

- **Geomorfología.** Las condiciones geomorfológicas de cada unidad, se definen en función de:
  - Pendiente promedio de la unidad, obtenida a partir de la generación en SIG de un modelo de elevación digital (DEM) con el uso de herramientas computacionales (por ejemplo el software ArcMap), sugiriéndose validar la información obtenida con algunos datos de terreno.
  - Altura máxima de la unidad, obtenida a partir de modelos de elevación digital y/o información topográfica de la zona (diferencia entre curvas de nivel), en algunos casos ajustada a datos de terreno.
  - Geometría de la ladera, considerando si presenta una geometría regular, irregular, recta, cóncava o convexa y ver la influencia que tiene esta condición en el tipo de mecanismo analizado. Para evaluar este condicionante se considera la revisión de fotografías aéreas, imágenes satelitales y en algunos casos evidencias de terreno, ya que no siempre la forma de la ladera o presencia de alguna geometría irregular puntual se refleja en la pendiente promedio.
  - Orientación de la ladera con respecto al Norte geográfico, lo que define las horas que estará expuesta la ladera a los rayos solares, y que influye directamente en la vegetación, espesores de suelo y humedad de la ladera.
  
- **Geología y geotecnia.** Los aspectos a considerar son:
  - Características geológicas y geotécnicas de la unidad. En este aspecto, se propone una diferenciación entre los mecanismos que afectan a rocas, de aquellos que ocurren en suelo. Para el caso las unidades en roca, considerando la escala de trabajo y utilidad de la metodología, se propone evaluar la calidad geotécnica a través de la estimación del parámetro RMR básico (Rock Mass Rating) propuesto por Bieniawski (1989), sin ajustes de diseño. Este representa la condición geotécnica in situ del macizo rocoso (de 1 a 100) a través de la evaluación de parámetros resistentes de la roca in situ, condición de agua, grado de fracturamiento y condición de las discontinuidades (Bieniawski, 1989). Un macizo de muy mala calidad geotécnica tendrá puntajes de RMR entre 0 y 20, mientras que un macizo de muy buena calidad geotécnica tendrá un puntaje RMR entre 80 y 100. Para mayor detalle de la metodología ver Anexo B. Para el caso de las unidades que tengan como material dominante suelo, regolito o roca muy meteorizada, se sugiere evaluar el grado de meteorización, alteración y espesor de suelo o cubierta de regolito, estimando sus propiedades geotécnicas como plasticidad, densidad, compacidad, permeabilidad y humedad.
  - Cercanía a una falla mayor. La presencia de una falla o zona de falla, sugiere que la calidad geotécnica de los macizos aledaños disminuirá, ya sea por un aumento en el grado de fracturamiento, disminución de la resistencia, presencia de salbanda, roca molida o rellenos arcillosos. En el caso de los flujos, las fallas actúan en superficie como canales naturales de conducción de agua o pueden generar un aumento en el material disgregado sensible a

ser movilizado por agua. La metodología propuesta, incorpora la presencia de fallas mayores o zonas de fallas que atraviesen áreas urbanas, mediante la determinación de ponderadores en función de la distancia de la o las trazas de una falla. El criterio utilizado se basa en la distancia estándar que limita la separación de cuadras (alrededor de 100 metros), considerando a zonas atravesadas por fallas mayores como más susceptibles, zonas a una distancia de menos de 100 metros de la traza como moderadamente susceptibles y unidades a más de 100 metros de la traza como menos susceptibles (Mardones et al., 2001). No obstante lo propuesto, las distancias pueden ser ajustadas a condiciones particulares de cada sector y de la disposición de la traza con respecto a la zona urbana. Este factor condicionante pretende además incorporar lo señalado por el apartado 2.1.17 de la O.G.U.C., que indica como una de las zonas de riesgo aquellas afectadas por fallas mayores.

- Para aquellos fenómenos analizados de tipo flujo, se incluye además dentro de las condiciones geológicas y geotécnicas del material, las condiciones de humedad y saturación en la ladera, evaluando la capacidad de saturación del material, profundidad del nivel freático, capacidad de almacenaje de agua en el suelo y variaciones estacionales de humedad, idealmente determinados mediante ensayos de terreno y laboratorio.
- **Intervención antrópica.** Como se mencionó anteriormente, una diferencia fundamental entre la metodología para evaluar susceptibilidad original propuesta por Lara (2007) y el presente trabajo, es la incorporación de la acción antrópica como un importante condicionante positivo o negativo en la susceptibilidad, evaluando específicamente la intervención humana y cómo esta puede reducir o favorecer la ocurrencia del fenómeno. Específicamente se sugiere evaluar:
  - Presencia de obra de estabilización mayor (por ejemplo, muros hormigón). Reduce susceptibilidad.
  - Sistema de bancos y/o Soporte robusto. Reduce susceptibilidad.
  - Unidad no intervenida (ladera natural). No aumenta ni reduce susceptibilidad (ponderado 0%).
  - Presencia de soporte insuficiente o intervención menor de la ladera. Aumenta susceptibilidad.
  - Regular desestabilización o intervención. Aumenta susceptibilidad.
  - Desestabilización evidente. Caso más crítico de aumento en la susceptibilidad, ponderando el mayor factor de las alternativas mencionadas.
- **Antecedentes de remociones en masa anteriores.** Para cada tipo de fenómeno analizado, se consideran la existencia de remociones en masa anteriores como un antecedente geomorfológico y de análisis retrospectivo importante. Los depósitos de remociones en masa, por lo general son sensibles a movilizarse nuevamente ya que en algunos casos son depositados con geometrías irregulares, o bien para definir alcance que pueden tener a partir de datos anteriores.
- **Clima y vegetación.** En los fenómenos de tipo deslizamientos y caídas, la evaluación del clima como un condicionante está asociado a la humedad en la ladera, y por consecuencia espesores de suelo y vegetación. Dependiendo del tipo

de evento analizado, la vegetación puede actuar como un condicionante positivo o negativo. En algunos casos de flujos, la vegetación puede favorecer la retención de bloques de mayor tamaño y dejar pasar material de menos tamaño y agua (decantador natural), o bien en algunos deslizamientos y caídas de roca, la vegetación también puede ser utilizada como una barrera de contención natural. En deslizamiento rotacionales superficiales, dependiendo del tipo de material, la vegetación puede evitar erosión y favorecer la estabilidad, pero en otros casos, especialmente en deslizamientos de suelos que provienen de rocas meteorizadas in situ, la vegetación es un condicionante que favorece la ocurrencia del mecanismo (aumento del espesor de suelo, aumento del grado de meteorización y reducción en la resistencia del material). En el presente trabajo, la vegetación se evalúa si es favorable o no a la ocurrencia del mecanismo.

- **Tipo de material.** Para los fenómenos de deslizamientos (roca o suelos) y caídas de rocas, se evalúa si el material existente en la unidad es compatible con el mecanismo. Si el material de la unidad es compatible con el mecanismo, el valor del factor será 1, de lo contrario, tendrá un valor de 0. Como ejemplo, para caídas o deslizamientos en roca, se debe considerar si el material de la ladera es roca, de lo contrario no aplica la evaluación. En el caso de unidades que tengan una materialidad notoriamente mixta (por ejemplo, rocas en la mitad inferior y suelo en la mitad superior), se deben analizar todos los posibles mecanismos.

En el caso de los flujos, para este factor se consideran tres casos: si el material de la unidad es compatible con el mecanismo (presencia suelo, detrito o material suelto en la unidad posible de ser arrastrado) o bien, si las laderas inmediatamente por sobre la unidad son susceptibles a presentar deslizamientos de suelo (IS deslizamientos de suelos mayores a 50), o en el caso contrario en que el material no es compatible con el mecanismo.

### 3.2.3 SUSCEPTIBILIDAD PARA CAÍDAS DE ROCA

Para caídas de rocas, se definieron distintos ponderadores (entendidos como pesos en porcentaje) de los condicionantes descritos en función de la importancia en la generación del mecanismo, los cuales fueron valorizados a partir de la metodología propuesta por Lara (2007) y ajustados a áreas urbanas utilizando como base el caso de estudio y experiencia de estudios anteriores. La Tabla 3.2 muestra los ponderadores considerados para caídas de roca, y la Tabla 3.3 muestra las especificaciones para cada factor con el peso asignado a cada rango.

**Tabla 3.2.**  
**Factores máximos considerados en caídas de rocas**

FACTOR	% máx.	DESGLOSE DE FACTORES	% máx.
GEOMORFOLOGIA (F1)	35	Pendiente Promedio de la unidad	15
		Altura máxima de la unidad	10
		Forma	10
GEOLOGÍA Y GEOTECNIA (F2)	20	Características Geológicas - Geotécnicas de la unidad	15
		Cercanía a una falla mayor y/o zona de cizalle	5
INTERVENCIÓN ANTRÓPICA (F3)	25	Presencia de Desestabilización/ Estabilización artificial. Se evalúa la condición de la unidad respecto al mecanismo analizado	25
ANTECEDENTES (F4)	10	Caídas de rocas reconocidas en la ladera	10
CLIMA Y VEGETACIÓN (F5)	10	Condición de Humedad en la ladera	5
		Presencia Vegetación	5

De Tabla 3.3, se puede calcular el índice de susceptibilidad para caídas de rocas de la siguiente forma:

$$IS_{\text{caídas rocas}} = (F1 + F2 + F3 + F4 + F5) \times F6$$

El factor F6 (0 o 1) está asociado a la compatibilidad del material de la unidad con el mecanismo analizado. De esta forma, si el material de la unidad no es compatible con el mecanismo, la susceptibilidad será nula.

**Tabla 3.3.**  
**Desglose de factores y peso (en %) para cada rango en caídas de rocas**

FACTOR	% máx.	DESGLOSE DE FACTORES	% máx.	ESPECIFICACIONES	RANGOS	%	
GEOMORFOLOGIA (F1)	35	Pendiente Promedio de la unidad	15	Considerar la pendiente promedio de la ladera (obtenida del rastreo de pendientes) o su valor en caso de tener el dato de terreno	10° - 20°	1	
					20° - 25°	2	
					25° - 30°	3	
					30° - 40°	8	
					40° - 60°	10	
	> 60°	15					
	35	Altura máxima de la unidad	10	Considerar la altura máxima de la unidad	0m - 5m	0	
					5m - 10m	1	
					10m - 15m	3	
					15m - 20m	4	
					20m - 30m	5	
					30m - 50m	7	
					50m - 100m	8	
	> 100m	10					
	35	Forma	10	Considerar si la ladera presenta una geometría regular, irregular, recta, concava o convexa y ver la influencia que tiene en el tipo de mecanismo analizado. Se evalúa la condición: si es una condición favorable, reduce la susceptibilidad; si es una geometría muy poco favorable, aumenta la susceptibilidad	muy favorable	0	
favorable					1		
media					4		
poco favorable					7		
muy poco favorable					10		
GEOLOGÍA Y GEOTECNIA (F2)	20	Características Geológicas - Geotécnicas de la unidad	15	Considerar la calidad del macizo rocoso, mediante estimación o determinación de Rock Mass Rating (RMR). Rangos utilizan valores de RMR	80-100	3	
					60-80	6	
					40-60	9	
					20-40	12	
	20	Cercanía a una falla mayor y/o zona de cizalle	5	Definir si la zona analizada está cerca de la falla mayor	Unidad a más de 100 metros de falla mayor	0	
					Unidad a menos de 100 metros de falla mayor	3	
					Unidad es atravesada por una falla mayor	5	
INTERVENCIÓN ANTRÓPICA (F3)	25	Presencia de Desestabilización/ Estabilización artificial. Se evalúa la condición de la unidad respecto al mecanismo analizado	25		Obra de estabilización mayor (por ejemplo, muros hormigón)	condición muy favorable	-10
					Sistema de bancos y/o Soporte robusto	condición favorable	-2
					Unidad no intervenida (ladera natural)	inexistente ambas (no intervenida)	0
					soporte insuficiente o intervención menor	condición medianamente favorable	15
					Regular desestabilización o intervención	condición desfavorable	19
					Desestabilización evidente	condición muy desfavorable	25
ANTECEDENTES (F4)	10	Caídas de rocas reconocidas en la ladera	10	Ver si existen registros o evidencias de caídas de roca en la ladera	Presente	10	
					no observado	0	
CLIMA Y VEGETACIÓN (F5)	10	Condición de Humedad en la ladera	5	Ver si hay humedad en la ladera y/o vegetación intensa	Presente	5	
					no observado	0	
	10	Presencia Vegetación	5	Ver si existe vegetación y si es favorable o no a la ocurrencia del mecanismo	No Favorable a la ocurrencia del mecanismo	0	
					Favorable a la ocurrencia del mecanismo	5	
TIPO MATERIAL (F6)				Si el tipo de material dominante en la ladera es compatible con el tipo de mecanismo	No compatible (suelos)	0	
					Si compatible (rocas)	1	

### 3.2.4 SUSCEPTIBILIDAD PARA DESLIZAMIENTOS TRASLACIONALES DE ROCA

En este caso, se analiza la susceptibilidad de las laderas a sufrir deslizamientos traslacionales de rocas (tipo fallas planas, cuñas o una combinación de ambos), diferenciándolos de deslizamientos traslacionales de suelo que serán abordados más adelante. De los distintos condicionantes identificados, se definieron ponderadores (peso en porcentaje) en función de la importancia de cada uno en la generación del mecanismo, a través de ajustes en la metodología original propuesta por Lara (2007), más ajustes realizados en un área piloto y experiencia de estudios anteriores. Los detalles se muestran en Tablas 3.4 y 3.5.

**Tabla 3.4.**  
**Factores máximos considerados en deslizamientos traslacionales de roca**

FACTOR	% máx.	DESGLOSE DE FACTORES	% máx.
GEOMORFOLOGIA (F1)	35	Pendiente Promedio de la Unidad	20
		Altura máxima de la unidad	10
		Forma	5
GEOLOGÍA Y GEOTECNIA (F2)	35	Características Geológicas - Geotécnicas de la unidad	10
		Fracturamiento y/o presencia de bloques preformados	20
		Cercanía a falla mayor y/o zona de cizalle	5
INTERVENCIÓN ANTRÓPICA (F3)	15	Presencia de Desestabilización/ Estabilización artificial. Se evalúa la condición de la unidad respecto al mecanismo analizado	15
ANTECEDENTES (F4)	10	Deslizamientos de bloques declarados en la ladera	10
CLIMA Y VEGETACIÓN (F5)	5	Condición de Humedad en la ladera	3
		Presencia Vegetación	2

De Tabla 3.5, se puede calcular el índice de susceptibilidad para deslizamientos traslacionales de la siguiente forma:

$$IS\_desliz\_tras = (F1 + F2 + F3 + F4 + F5) \times F6$$

El factor F6 (0 o 1) está asociado a la compatibilidad del material de la unidad con el mecanismo analizado. De esta forma, si el material de la unidad no es compatible con el mecanismo, la susceptibilidad será nula.

**Tabla 3.5.**  
**Desglose de factores y peso (en %) para cada rango de deslizamientos traslacionales de rocas**

FACTOR	% máx.	DESGLOSE DE FACTORES	% máx.	ESPECIFICACIONES	RANGOS	%
GEOMORFOLOGIA (F1)	35	Pendiente Promedio de la Unidad	20	Considerar la pendiente promedio de la ladera (obtenida del rastreo de pendientes) o su valor en caso de tener el dato de terreno	10° - 20°	1
					20° - 25°	2
					25° - 30°	3
					30° - 40°	10
					40° - 60°	13
	> 60°	20				
	35	Altura máxima de la unidad	10	Considerar la altura máxima de la unidad	0m - 5m	1
					5m - 10m	2
					10m - 15m	3
					15m - 20m	4
					20m - 30m	5
					30m - 50m	7
					50m - 100m	8
	> 100m	10				
	35	Forma	5	Considerar si la ladera presenta una geometría regular, irregular, recta, concava o convexa y ver la influencia que tiene en el tipo de mecanismo analizado. Se evalúa la condición: si es una condición favorable, reduce la susceptibilidad; si es una geometría muy poco favorable, aumenta la susceptibilidad	muy favorable	-2
favorable					0	
media					2	
poco favorable					4	
muy poco favorable					5	
GEOLOGÍA Y GEOTECNIA (F2)	35	Características Geológicas - Geotécnicas de la unidad	10	Considerar la calidad del macizo rocoso, mediante estimación o determinación de Rock Mass Rating (RMR). Rangos utilizan valores de RMR	80-100	4
					60-80	8
					40-60	12
					20-40	16
	35	Fracturamiento y/o presencia de bloques preformados	20	Evaluar si existen en la unidad bloques preformados limitados por estructuras que sean susceptibles a deslizar	0-20	20
					no observado	1
					presentes puntualmente	6
					medianamente presentes	8
					muy presentes	10
					Unidad a más de 100 metros de falla mayor	0
35	Cercanía a falla mayor y/o zona de cizalle	5	Definir si la zona analizada está cerca de la falla mayor	Unidad a menos de 100 metros de falla mayor	3	
				Unidad es atravesada por una falla mayor	5	
INTERVENCIÓN ANTRÓPICA (F3)	15	Presencia de Desestabilización/ Estabilización artificial. Se evalúa la condición de la unidad respecto al mecanismo analizado	15	Obra de estabilización mayor (por ejemplo, muros hormigón)	muy favorable	-12
				Sistema de bancos y/o Soporte robusto	favorable	-6
				Unidad no intervenida (ladera natural)	nulo	0
				soporte insuficiente o intervención menor	medianamente favorable	6
				Regular desestabilización o intervención	desfavorable	9
ANTECEDENTES (F4)	10	Deslizamientos de bloques declarados en la ladera	10	Desestabilización evidente	muy desfavorable	15
				Ver si existen registros o evidencias de deslizamientos en la ladera	Presente	10
CLIMA Y VEGETACIÓN (F5)	5	Condición de Humedad en la ladera	3	Ver si hay humedad en la ladera y/o vegetación intensa	no observado	0
					Presente	3
		Presencia Vegetación	2	Ver si existe vegetación y si es favorable o no a la ocurrencia del mecanismo	No Favorable a la ocurrencia del mecanismo	0
					Favorable a la ocurrencia del mecanismo	2
<b>TIPO DE MATERIAL (F6)</b>			Considerar si el material es compatible con el mecanismo. En este caso roca	No compatible	0	
				Si compatible	1	



### 3.2.5 SUSCEPTIBILIDAD PARA DESLIZAMIENTOS ROTACIONALES

En este caso, se analiza la susceptibilidad de las laderas a sufrir deslizamientos de tipo rotacionales tanto de suelos, sedimentos poco consolidados o macizos rocosos de baja calidad geotécnica, considerando para ello valores de RMR menores a 20, o rocas con baja resistencia a la compresión uniaxial (menor a 27.5 MPa) equivalente a una dureza menor o igual a R2 estimada a partir de golpes de martillo geológico según la clasificación de la International Society for Rock Mechanics (ISRM, 1981).

Al igual que en los casos anteriores, para deslizamientos rotacionales se definieron ponderadores (peso en porcentaje) en función de la importancia de cada uno en la generación del mecanismo a partir de la misma información que en casos anteriores y detalladas en Tablas 3.6 y 3.7.

**Tabla 3.6.**  
**Factores máximos considerados en deslizamientos rotacionales**

FACTOR	% máx.	DESGLOSE DE FACTORES	% máx.
GEOMORFOLOGIA (F1)	35	Pendiente Promedio de la Ladera	15
		Altura máxima de la unidad	10
		Exposición al Sol	5
		Forma	5
GEOLOGÍA Y GEOTECNIA (F2)	35	Características Geológicas - Geotécnicas de la unidad	25
		Cercanía a falla mayor y/o zona de cizalle	10
INTERVENCIÓN ANTRÓPICA (F3)	10	Presencia de Desestabilización/ Estabilización artificial. Se evalúa la condición de la unidad respecto al mecanismo analizado	10
ANTECEDENTES (F4)	10	Deslizamientos rotacionales declarados	10
CLIMA Y VEGETACIÓN (F5)	10	Condición de Humedad en la ladera	5
		Presencia Vegetación	5

De Tabla 3.7, se puede calcular el índice de susceptibilidad para deslizamientos rotacionales de la siguiente forma:

$$IS\_desliz\_rot = (F1 + F2 + F3 + F4 + F5) \times F6$$

El factor F6 (valores 0 o 1) está relacionado con la compatibilidad del material de la unidad con mecanismos de tipo rotacionales. De esta forma, si el material de la unidad no es compatible con el mecanismo, la susceptibilidad será nula.

**Tabla 3.7.**  
**Desglose de factores y peso (en %) para cada rango en deslizamientos rotacionales**

FACTOR	% máx.	DESGLOSE DE FACTORES	% máx.	ESPECIFICACIONES	RANGOS	%
GEOMORFOLOGÍA (F1)	35	Pendiente Promedio de la Ladera	15	Considerar la pendiente promedio de la ladera (obtenida del rastreo de pendientes) o su valor en caso de tener el dato de terreno	15° - 20°	1
					20° - 25°	2
					25° - 30°	3
					30° - 35°	8
					35° - 40°	10
		> 40°	15			
		Altura máxima de la unidad	10	Considerar la altura máxima de la unidad	0m - 5m	1
					5m - 10m	2
					10m - 15m	3
					15m - 20m	4
	20m - 30m				5	
	Exposición al Sol	5	Considerar la orientación de la ladera con respecto al Norte (en la zona central de Chile, considerar Alta (NW, W y SW ); Parcial (N, NE) y Baja (S, NE)	30m - 50m	7	
				50m - 100m	8	
	Forma	5	Considerar si la ladera presenta una geometría regular, irregular, recta, concava o convexa y ver la influencia que tiene en el mecanismo de inestabilidad analizado	> 100m	10	
				baja	1	
				parcial	3	
alta				5		
muy favorable				-2		
GEOLOGÍA Y GEOTECNIA (F2)	35	Características Geológicas - Geotécnicas de la unidad	25	Considerar la calidad del macizo rocoso y grado de meteorización. Considerar espesor de suelo o cubierta de regolito. Se evalúa condición ante posible ocurrencia del mecanismo	favorable	0
					media	2
					poco favorable	4
					muy poco favorable	5
					muy poco favorable	4
	Cercanía a falla mayor y/o zona de cizalle	10	Definir si la zona analizada está cerca de la falla mayor		poco favorable	8
					medianamente favorable	12
					favorable	16
					muy favorable	20
					Unidad a más de 100 metros de falla mayor	0
INTERVENCIÓN ANTRÓPICA (F3)	10	Presencia de Desestabilización/ Estabilización artificial. Se evalúa la condición de la unidad respecto al mecanismo analizado	10	Obra de estabilización mayor (por ejemplo, muros hormigón)	Unidad a menos de 100 metros de falla mayor	3
					Unidad es atravesada por una falla mayor	5
					muy favorable	-7
					favorable	-4
					nulo	0
					Unidad no intervenida (ladera natural)	0
ANTECEDENTES (F4)	10	Deslizamientos rotacionales declarados	10	Ver si existen registros o evidencias de deslizamientos rotacionales	soporte insuficiente o intervención menor	4
					Regular desestabilización o intervención	7
CLIMA Y VEGETACIÓN (F5)	10	Condición de Humedad en la ladera	5	Ver si hay humedad en la ladera y/o vegetación intensa	Desestabilización evidente	10
					muy desfavorable	7
		Presencia Vegetación	5	Ver si existe vegetación y si es favorable o no a la ocurrencia del mecanismo	Presente	10
					no observado	0
TIPO DE MATERIAL (F6)				Ver si el material de la ladera es compatible con el mecanismo	Presente	5
					no observado	0
				Compatible: Suelos, sedimentos poco consolidados, macizos de muy mala calidad geotécnica o rocas blandas (dureza ≤ R2)	1	
				No compatible: Macizos de regular a muy buena calidad geotécnica; rocas con dureza R3 o mayor	0	

### 3.2.6 SUSCEPTIBILIDAD PARA DESLIZAMIENTOS SUPERFICIALES DE SUELO

Para deslizamientos superficiales de suelo, se definieron ponderadores (peso en porcentaje en función de la importancia en la generación del mecanismo) a partir de la misma información que en casos anteriores y detalladas en Tablas 3.8 y 3.9.

**Tabla 3.8.**  
**Factores máximos considerados en deslizamientos superficiales de suelo**

FACTOR	% máx.	DESGLOSE DE FACTORES	% máx.
GEOMORFOLOGIA (F1)	35	Pendiente Promedio de la Ladera	15
		Altura máxima de la unidad	5
		Exposición al Sol	10
		Forma	5
GEOLOGÍA Y GEOTECNIA (F2)	25	Características Geológicas - Geotécnicas	15
		Cercanía a falla mayor y/o zona de cizalle	10
INTERVENCIÓN ANTRÓPICA (F3)	10	Presencia de Desestabilización/ Estabilización artificial. Se evalúa la condición de la unidad respecto al mecanismo analizado	10
ANTECEDENTES (F4)	10	Deslizamientos de suelos declarados	10
CLIMA Y VEGETACIÓN (F5)	20	Condición de Humedad en la ladera	10
		Presencia Vegetación	10

De Tabla 3.9, se puede calcular el índice de susceptibilidad para deslizamientos en suelo de la siguiente forma:

$$IS\_desliz\_sue = (F1 + F2 + F3 + F4 + F5) \times F6$$

Al igual que los casos anteriores, el factor F6 (0 o 1) está relacionado con la existencia de cubierta de suelos o regolito en la unidad. De esta forma, si el material de la unidad no es compatible con el mecanismo (o no existe), la susceptibilidad será nula.

**Tabla 3.9.**  
**Desglose de factores y peso (en %) para cada rango en deslizamientos superficiales de suelo**

FACTOR	% máx.	DESGLOSE DE FACTORES	% máx.	ESPECIFICACIONES	RANGOS	%
GEOMORFOLOGIA (F1)	35	Pendiente Promedio de la Ladera	15	Considerar la pendiente promedio de la ladera (obtenida del rastreo de pendientes) o su valor en caso de tener el dato de terreno	15° - 20°	1
					20° - 25°	2
					25° - 30°	3
					30° - 35°	8
					35° - 40°	10
	> 40°	15				
	Altura máxima de la unidad	5	Considerar la altura completa de la ladera	0m - 10m	1	
				10m - 20m	2	
				20m - 30m	3	
				30m - 40m	4	
				> 40m	5	
	Exposición al Sol	10	Considerar la orientación de la ladera con respecto al Norte (en la zona central de Chile, considerar Alta (NW, W y SW ); Parcial (N, NE) y Baja (S, NE)	baja	3	
				parcial	5	
	Forma	5	Considerar si la ladera presenta una geometría regular, irregular, recta, concava o convexa y ver la influencia que tiene en el mecanismo de inestabilidad analizado	alta	10	
				muy favorable	-2	
favorable				0		
media				2		
poco favorable				4		
GEOLOGÍA Y GEOTECNIA (F2)	25	Características Geológicas - Geotécnicas	15	Considerar la calidad del macizo rocoso y grado de meteorización. Considerar espesor de suelo o cubierta de regolito. Se evalúa condición ante posible ocurrencia del mecanismo	muy poco favorable	5
					muy poco favorable	3
					poco favorable	6
					medianamente favorable	9
					favorable	12
	muy favorable	15				
	Cercanía a falla mayor y/o zona de cizalle	10	Definir si la zona analizada está cerca de la falla mayor	Unidad a más de 100 metros de falla mayor	0	
				Unidad a menos de 100 metros de falla mayor	5	
				Unidad es atravesada por una falla mayor	10	
				muy favorable	-4	
favorable				-2		
INTERVENCIÓN ANTRÓPICA (F3)	10	Presencia de Desestabilización/ Estabilización artificial. Se evalúa la condición de la unidad respecto al mecanismo analizado	10	Obra de estabilización mayor (por ejemplo, muros hormigón)	muy favorable	-4
				Sistema de bancos y/o Soporte robusto	favorable	-2
				Unidad no intervenida (ladera natural)	nulo	0
				soporte insuficiente o intervención menor	medianamente importante	2
				Regular desestabilización o intervención	importante	4
Desestabilización evidente	muy importante	10				
ANTECEDENTES (F4)	10	Deslizamientos de suelos declarados	10	Ver si existen registros o evidencias de caídas de deslizamientos de suelos	Presente	10
					no observado	0
CLIMA Y VEGETACIÓN (F5)	20	Condición de Humedad en la ladera	10	Considerar humedad de la ladera, profundidad del nivel freático, niveles impermeables, saturación	Evidente	10
					presente	7
					posible	3
	Presencia Vegetación	10	Ver si existe vegetación y si es favorable o no a la ocurrencia del mecanismo	sin antecedentes	0	
				No favorable	4	
TIPO DE MATERIAL (F6)				Ver si el material de la ladera es compatible con el mecanismo	Favorable al mecanismo	10
					compatible con el mecanismo	1
					no compatible con el mecanismo	0

### 3.2.7 SUSCEPTIBILIDAD PARA FLUJOS

En el caso de flujos, se definieron ponderadores (peso en porcentaje en función de la importancia en la generación del mecanismo) ajustados de Lara (2007). La evaluación de este mecanismo está orientada a la generación de flujos en unidades de tipo canal de drenaje, considerando que la generación de un posible flujo será a partir de arrastre de material contenido en la unidad, o bien, en caso que la susceptibilidad a deslizamientos de suelos de las unidades inmediatamente superiores sea mayor a 50. Con esto, se pretende cubrir en todos los casos la generación del flujo, sin considerar el alcance que puede tener (ver detalles en Tablas 3.10 y 3.11). Para este caso, se requiere seguir un orden en el análisis, partiendo por los deslizamientos de suelo y siguiendo posteriormente por los flujos.

**Tabla 3.10.**  
**Factores máximos considerados en flujos**

FACTOR	% máx.	DESGLOSE DE FACTORES	% máx.
GEOMORFOLOGÍA (F1)	35	Pendiente del canal de drenaje	20
		Encajamiento del canal de drenaje	15
GEOLOGÍA Y GEOTECNIA (F2)	30	Condición de Humedad y saturación en la ladera	10
		Carácter. Geológicas - Geotécnicas	15
		Cercanía a falla mayor y/o zona de cizalle	5
INTERVENCIÓN ANTRÓPICA (F3)	10	Presencia de escombros o obstrucción del canal en forma artificial	10
ANTECEDENTES (F4)	15	Aluviones declarados en la cuenca hidrográfica	15
VEGETACIÓN (F5)	10	Características y rol de la vegetación	10

De Tabla 3.11, se puede calcular el índice de susceptibilidad para deslizamientos en suelo de la siguiente forma:

$$IS\_desliz\_sue = (F1 + F2 + F3 + F4 + F5) \times F6$$

El factor F6 (0 o 1) actúa en forma análoga a los casos anteriores, es decir si el material de la unidad no es compatible con el mecanismo, la susceptibilidad será nula.

Particularmente en el caso de los flujos, tomará valores de 1 cuando el material de la unidad es compatible con mecanismos tipo flujo, o bien, cuando el material no es compatible pero las unidades inmediatamente aledañas pudiesen aportar material mediante deslizamientos de suelo.

**Tabla 3.11.**  
**Desglose de factores y peso (en %) para cada rango en mecanismos tipo flujo**

FACTOR	% máx.	DESGLOSE DE FACTORES	% máx.	ESPECIFICACIONES	RANGOS	%
GEOMORFOLOGÍA (F1)	35	Pendiente del canal de drenaje	20	Se usa pendiente promedio de canal de drenaje	<5°	5
					5°-10°	15
					>10°	20
		Encajamiento del canal de drenaje	15	Geomorfología y relación profundidad / ancho del canal. Alto encajonamiento, alta razón (>0.7)	alto	15
					medio	8
			bajo	4		
GEOLOGÍA Y GEOTECNIA (F2)	30	Condición de Humedad y saturación en la ladera	10	Asociado a: (1) Capacidad de saturación Nv. Freático < 2m poco favorable; >2m poco favorable; 2m favorable (2) capacidad de almacenaje de agua en el suelo (3) variaciones estacionales de humedad	muy favorable	10
					favorable	7
					medianamente favorable	5
					poco favorable	3
					sin antecedentes	0
		Carácter. Geológicas - Geotécnicas	15	Considerar la calidad del macizo rocoso y grado de meteorización. Considerar espesor de suelo o cubierta de regolito. Se evalúa condición ante posible ocurrencia del mecanismo	muy poco favorable	2
					poco favorable	6
					medianamente favorable	10
		Cercanía a falla mayor y/o zona de cizalle	5	Definir si la zona analizada está cerca de la falla mayor	favorable	12
					muy favorable	15
					Unidad a más de 100 metros de falla mayor	1
INTERVENCIÓN ANTRÓPICA (F3)	10	Presencia de escombros o obstrucción del canal en forma artificial	10	Considerar si existen obras de contención de flujo (como piscinas decantadoras) o obstrucción del cauce por escombros, basura, troncos, otros	Unidad a menos de 100 metros de falla mayor	3
					Unidad es atravesada por una falla mayor	5
					Sistema de contención de flujos	-5
					no observado	1
					baja obstrucción	5
ANTECEDENTES (F4)	15	Aluviones declarados en la cuenca hidrográfica	15	Información escrita y/u observación de depósitos de flujos en la unidad	moderada obstrucción	7
					importante obstrucción	10
					sin antecedentes	5
VEGETACIÓN (F5)	10	Características y rol de la vegetación	10	Evaluar si la vegetación en la unidad es favorable o no para detener el mecanismo. Considerar favorable, árboles y arbustos con raíces robustas (que actúen como decantadores naturales). Considerar desfavorable vegetación fácilmente desgarrable y que aumenten el	prehistóricos	10
					históricos	15
TIPO DE MATERIAL (F6)		Evaluar si en la unidad hay material compatible con el mecanismo y evaluar si las unidades inmediatamente aledañas pueden aportar dicho material	1	Se evalúa si el material de la unidad es compatible con el mecanismo. Si compatible (cauces activos o secos, trazas de quebradas) se multiplica suma de factores ponderados por 1. Si no es compatible, se evalúa si las unidades inmediatamente por sobre la unidad tienen IS de Deslizamientos superficiales de suelo > 50 (multiplicar por 1) o menor que 50 (multiplicar por 0)	desfavorable	10
			1		compatible	1
			0		No compatible y Unidades inmediatamente encima tienen IS deslizamiento superficial suelo > 50	1
					No compatible y unidades aledañas sobre la unidad tienen IS deslizamiento superficial suelo < 50 o existen unidades aledañas que aporten material	0

### 3.3 ALCANCES DE LA METODOLOGÍA

Para la evaluar la susceptibilidad de remociones en masa en áreas urbanas utilizando las tablas propuestas, se sugiere una escala de trabajo entre 1:5.000 y 1:10.000 o incluso menor, con áreas de trabajo no se superen las 150 unidades de análisis. Esto permite identificar de mejor forma aquellas áreas sensibles a la ocurrencia de remociones en masa a menor escala y que no logran muchas veces ser identificadas en estudios a escala comunal.

Con esta premisa, la metodología podría ser utilizada en distintas áreas pertenecientes a zonas urbanas, entregando así una primera aproximación antes de un análisis de estabilidad típico, el cual podría estar orientado sólo en aquellas laderas que presenten un índice de susceptibilidad crítico ( $IS > 50$ , alta a muy alta susceptibilidad), optimizando así los tiempos de trabajo.

De las tablas presentadas se puede observar que, en algunos casos, el condicionante “intervención antrópica” pondera de forma positiva o negativa, es decir, suma o resta puntaje a la susceptibilidad total del fenómeno analizado. Esta propuesta se basa en observaciones de terreno, aplicación y validación de la metodología en un área piloto de análisis. En el caso del condicionante “clima”, considera que la evaluación se hará bajo las condiciones climáticas más desfavorables en caso de cambios estacionales notorios entre verano e invierno. De la misma forma, las condiciones de humedad de la ladera, e incluso presencia de vegetación estará evaluada a partir de las condiciones estacionales más favorables para la ocurrencia de cada tipo de remoción. De la misma forma, en el caso de unidades que presenten una materialidad mixta a lo largo de la ladera, se deben analizar todos los posibles tipos de remociones que se puedan generar en su condición más desfavorable (altura, forma, pendiente) a no ser que se cuenten con datos directos.

Se destaca de la metodología la incorporación de fallas geológicas como un condicionante de generación de remociones en masa, lo que podría establecer una forma de abordar estudios de riesgo, peligro y susceptibilidad que den cumplimiento con la ley actualmente (O.G.U.C., apartado 2.1.17, DS N°47 de 1992 y su modificación D.O. 13.04.11), que señala como áreas de riesgo zonas con posibilidad de ser afectadas por fallas geológicas.

Es importante señalar que las tablas propuestas están orientadas a evaluar susceptibilidad de generación de remociones en masa, sin considerar el alcance que estas puedan tener, en términos de distancias recorridas por la masa movilizada o distancias de deposición respecto a la ladera. Este parámetro debiera ser evaluado en una etapa posterior de análisis de estabilidad o cálculo de peligro de las unidades críticas, incluyendo la cartografía de la zona urbana como variable, ya que en algunas ocasiones puede condicionar con mayor peso el alcance de una remoción, especialmente en el caso de los flujos (descendiendo por avenidas o frenando su caudal con construcciones urbanas).

### 3.4 ETAPAS SIGUIENTES: ANÁLISIS DE UNIDADES CRÍTICAS Y ENTREGA DE RECOMENDACIONES

En general, los métodos de análisis de estabilidad se basan en un planteamiento físico-matemático en el que intervienen fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras que actúan sobre el talud, determinando su nivel de estabilidad y comportamiento (González de Vallejo et al., 2002). En el último tiempo diversos autores han desarrollado en el mundo una serie de metodologías, utilizando diferentes herramientas que buscan evaluar los procesos de generación de remociones en masa de forma cualitativa, cuantitativa o mixta (Lara, 2007). En las primeras, la calificación de áreas sensibles se basa en observaciones, consideración de condicionantes (ponderados por importancia o no), superposición de variables o utilizando principios de lógica. En este tipo de análisis, las variables consideradas no necesariamente son evaluadas en forma numérica, pudiendo establecerse rangos basados en categorías como alta, media, baja, u otras, teniendo un enfoque más subjetivo.

Por el contrario, las metodologías cuantitativas permiten evaluar los elementos que la componen de forma numérica (a partir de modelos determinísticos, estadísticos o probabilísticos), entregando resultados o rangos numéricos. En el caso de remociones en masa, las metodologías cuantitativas están orientadas a determinar la estabilidad de la ladera o definir la probabilidad de falla de la misma. La forma de abordar el problema mediante el uso de metodologías mixtas mezcla las dos anteriores, incluyendo algunos aspectos de manera cualitativa (como por ejemplo, los factores condicionantes ponderados por importancia) y analizan numéricamente la estabilidad o probabilidad de ocurrencia de un fenómeno.

Si bien existen variadas técnicas de análisis de estabilidad (geométrica, numérica, empírica, conceptual o simplemente basadas en la experiencia), y los pasos para abordarlos están por lo general bien establecidos tanto en la literatura y como en la legislación, a la hora de construir no siempre se llevan a cabo, ya sea por desconocimiento del tema o por falta de presupuesto.

Un caso típico de esto último, lo representan autoconstrucciones en áreas urbanas sin la adecuada autorización o planificación (por lo general asociadas al segmento de menor ingreso en el país), y que en muchas ocasiones ocupan terrenos con fuertes pendientes sin un adecuado estudio (ver Fotografía 3.1), y en las cuales el costo de realizar los estudios y las medidas paliativas supera con creces el valor de la vivienda, transformándose no sólo en un problema de seguridad para sus habitantes, sino que en un problema social.





**Fotografía 3.1. Ejemplo de autoconstrucciones en zonas con fuertes pendientes.  
Fuente: Obtención propia. Fotografía del sector Forestal (Las Palmas, Viña del Mar)**

Independiente de la metodología de análisis escogida, además de considerar las características y propiedades de las variables (geológicas, geotécnicas, hidrológicas, etc.), la cantidad y calidad de los datos disponibles, se deben definir los alcances del estudio y resultados que se espera tener (González de Vallejo et al., 2002), sin dejar de lado los montos disponibles para su realización, implementación de medidas y la urgencia que estas puedan tener.

En el Anexo C se presentan en forma general algunas de las técnicas de análisis para distintos mecanismos de remociones en masa que usualmente se utilizan en el mercado, no siendo parte de los objetivos del presente estudio profundizar en ellas.

## **CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD DE RESPUESTA SÍSMICA ASOCIADA A FALLAS MAYORES EN ÁREAS URBANAS**

### **4.1 INTRODUCCIÓN**

La presencia de fallas geológicas a lo largo del territorio nacional es frecuente, por lo tanto algunas zonas urbanas se encuentran emplazadas sobre o en el entorno a estas estructuras. La presencia de una falla geológica permite suponer una serie de posibles consecuencias, como por ejemplo un cambio en las unidades geológicas, presencia de zonas de cizalle o macizos rocosos con menor calidad geotécnica, en algunos casos posible actividad sísmica asociada a fallas activas, o reactivación de fallas producto de grandes sismos (Farías et al., 2011).

Los límites para definir si una falla es activa pueden ser variables, por ejemplo en función de las condiciones tectónicas, o a partir de las leyes específicas de cada país, o en función de la vida útil y niveles de seguridad de un proyecto específico. En términos geológicos una falla activa es aquella falla que ha presentado movimiento durante el régimen tectónico actual (Sabaj, 2008), mientras que en ingeniería geológica, una falla activa es la que ha presentado movimiento en los últimos 10.000 años (Holoceno). Según Kerr et al. (2003), una falla activa es aquella que ha presentado movimiento repetidamente en el pasado y su historia indica que podría presentarlo nuevamente. En términos de vida útil y niveles de seguridad de un proyecto, se cita como ejemplo el diseño de presas en España, que considera evaluar sismicidad asociadas a fallas entre 1.000 y 10.000 años, mientras que para instalaciones radiactivas este periodo se extiende por 500.000 años (González de Vallejo et al., 2002). Sabaj (2008) considera además como fallas potencialmente activas a aquellas estructuras que coincidan con rasgos morfológicos y/o presenten evidencias de posibles movimientos en los últimos 5,3 Ma.

Según González de Vallejo et al. (2002) las fallas sísmicas o generadoras de terremotos tendrían un comportamiento mecánico muy diferente a una falla asísmica, donde además de diferenciar los mecanismos de deformación que presentan y el régimen de desplazamiento, resulta interesante saber respecto a si existe movimiento de fallas inactivas durante grandes terremotos. Esta última interrogante se plantea por ejemplo con el sismo de Antofagasta de 1995 (Delouis et al., 1997) o con la falla Marga-Marga (Galdames y Saragoni, 2002; Muñoz et al., 2010), o con el sismo Mw 8.8 del 27 de Febrero de 2010, donde se reconocieron desplazamientos co-sísmicos y deformación en superficie (Arriagada et al., 2011), así como reactivación de fallas geológicas al interior del continente manifestada de manera sísmica (con el terremoto de Pichilemu del 11 de marzo de 2010, Farías et al., 2011).

En Chile existe escasa información de la génesis y actividad sísmica de cortical (Barrientos et al., 2004). Sin embargo, existen antecedentes históricos de terremotos asociados a este tipo de fuentes en la parte chilena de la Cordillera de los Andes, como por ejemplo el sismo de 1958 (Las Melosas) con una magnitud de 6,9 y una profundidad focal observada de 10 kilómetros (Lomnitz, 1961) y recalculado en 6,3 por Alvarado et al., 2008, o el sismo de Aysén del año 2007, con una Magnitud Mw 6,2 (Sepúlveda y Serey, 2009).

No obstante la carencia de información acerca de sismos superficiales en Chile, existen zonas de reconocida actividad sísmica de tipo superficial como la zona cordillerana de Chile Central y el Altiplano (Barrientos y Kausel, 1993). Los antecedentes de magnitudes máximas de terremotos superficiales en Chile indicarían que en general son menores a 7,0, aunque en la zona central de Chile existen fallas activas que podrían generar eventos de magnitud mayor, 7,5 por el lado seguro de las observaciones (Leyton et al., 2010), mencionando como ejemplo, la Zona de Falla San Ramón (al oriente de la ciudad de Santiago) donde se esperarían magnitudes para sismos importantes en del orden de Mw 6,9-7,4, dada su geometría en superficie y estructura en profundidad (Armijo et al., 2010).

Sabaj (2008) estudia las fallas potencialmente activas de la Cordillera de la Costa en Chile Central mediante la aplicación de relaciones empíricas, estimando el potencial sísmogénico determinístico de cada estructura a partir de su traza y mecanismo. Estas características incluyen la magnitud máxima posible, los desplazamientos máximos y promedio que cada falla puede ocasionar, y las aceleraciones que sufrirían las rocas cercanas a estas fallas, determinando magnitudes (Mw) máximas posibles preliminares en el rango entre 5,8 y 7,1.

A partir de lo descrito anteriormente, independiente de si una falla se considera activa o inactiva, en su evaluación se debiesen incluir todos sus posibles efectos, especialmente en áreas urbanas, y de esta forma dar cumplimiento con la ley vigente en Chile que exige la consideración de áreas de riesgo por presencia de fallas geológicas (en el artículo 2.1.17 de la O.G.U.C.). Dentro de los posibles efectos, se deben considerar potenciales desplazamientos y deformación durante un sismo, ya sea mediante la rotura de la superficie del terreno por desplazamientos de fallas activas (González de Vallejo et al., 2002) o mediante deformaciones inducidas por fallas inactivas que generarán un comportamiento distinto en la zona por la cual atraviesan (Galdames y Saragoni, 2002), además de su influencia en fenómenos de remociones en masa (abordados en el capítulo anterior).

A continuación se propone una metodología que permita determinar la susceptibilidad de respuesta sísmica de zonas aledañas a fallas mayores en áreas urbanas, entendida como zonas sensibles a presentar posibles deformaciones superficiales, rupturas superficiales o una mayor intensidad ante sismos. Esta metodología es una forma preliminar de abordar las fallas mayores que atraviesan zonas urbanas, pudiendo profundizarse con estudios sísmológicos y geológicos-estructurales en función de los resultados.

## 4.2 METODOLOGÍA PROPUESTA

La metodología propuesta se desarrolla básicamente en tres etapas que permiten contar y ponderar los antecedentes para evaluar la sensibilidad de respuesta sísmica, los que sumados resultaran en un cierto valor de susceptibilidad, aclarando que no todos los antecedentes pueden estar disponibles o dentro de los alcances del estudio.

### **Etapas 1. Gabinete.**

Esta etapa está orientada a recopilar todos los antecedentes disponibles de la o las fallas, tales como:

- Antecedentes geológicos. Revisión de mapas geológicos y publicaciones que hagan referencia a la ubicación de trazas, tipo de falla, movimientos en tiempo geológico, desplazamiento de unidades.
- Antecedentes geomorfológicos. Revisión de fotografías aéreas, imágenes satelitales, publicaciones, mapas topográficos y modelos de elevación digital que permitan identificar potenciales saltos acumulados, movimientos cosísmicos, desniveles y escarpes, desviación de cauces y escalones morfológicos, entre otros.
- Antecedentes sísmicos y paleosísmicos. Revisión de publicaciones y estudios que den cuenta del marco tectónico y posibles movimientos recientes, además de análisis paleosismicidad de la falla, donde se estimen magnitud de paleoterremotos o que establezcan dataciones de eventos sísmicos.
- Antecedentes de daños por sismos históricos. A partir de registros históricos, prensa y estudios anteriores, considerar la ocurrencia de daños a construcciones e infraestructuras posteriores a un evento sísmico, como por ejemplo construcciones con daño estructural, orden de desalojo u orden de demolición.

Se sugiere que los antecedentes sean geo referenciados y trabajados mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG).

### **Etapas 2. Terreno.**

Esta etapa está orientada a recopilar evidencias de terreno que permitan identificar o validar información recopilada en la etapa anterior, como por ejemplo antecedentes geológicos y geomorfológicos de la existencia de la falla. Específicamente se recomienda realizar:

- Mapeo geológico y estructural orientado a validar la existencia, ubicación, disposición, ancho de la traza de la falla y posibles rellenos de las estructura.
- Caracterización del macizo en el entorno a la fallas
- Recoger evidencias de posible actividad reciente (observando por ejemplo, desplazamientos en depósitos más jóvenes que 5,3 Ma (Sabaj, 2008) o movimientos en los últimos 10.000 años.

### **Etapas 3. Gabinete.**

La última etapa está orientada a realizar la superposición de antecedentes recopilados en las dos etapas anteriores, lo que permitirá la definición de unidades de análisis en el área de estudio y evaluación de los condicionantes. Se sugiere el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para facilitar la superposición de antecedentes, la

definición zona de análisis y su división en unidades (por ejemplo, ArcMap de ArcGis) como se muestra en la Figura 4.1

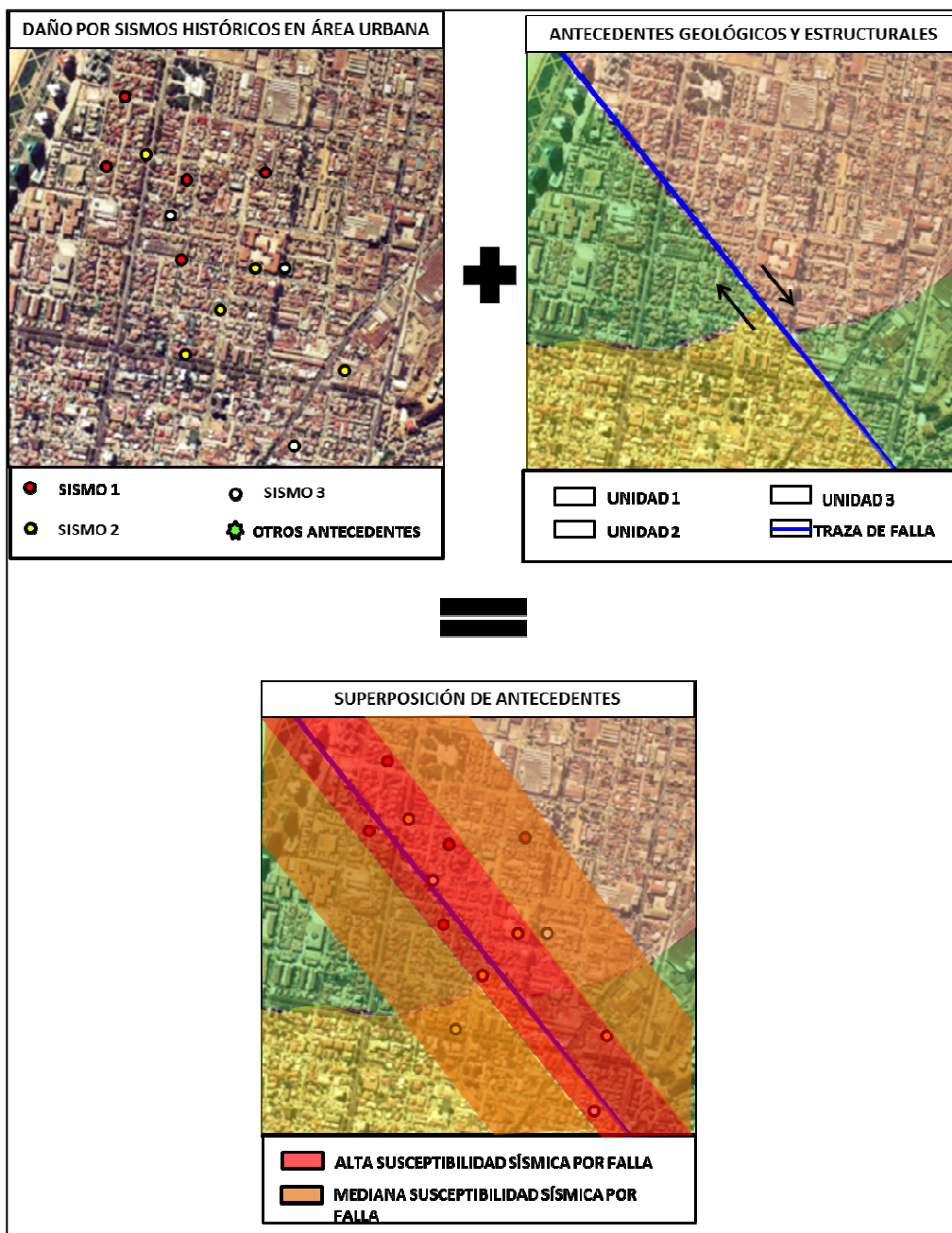


Figura 4.1. Esquema mostrando de forma gráfica cómo abordar la metodología propuesta.  
Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.1 UNIDADES DE ANÁLISIS

Se propone la división del área de estudio en unidades de análisis basándose en criterios geométricos a partir de la traza de la falla principal a evaluar, tomando en consideración la disposición de esta respecto a la zona urbana. Esta subdivisión permitirá definir una o varias franjas en el entorno a la estructura que pudiesen presentar una respuesta sísmica particular (como deformaciones, rupturas o una mayor intensidad sísmica).

El ancho de las unidades puede variar en cada caso particular de estudio, sin embargo como antecedente se citan estudios de planificación territorial sobre fallas activas en Nueva Zelanda, donde se sugiere considerar franjas de 20 metros a cada lado de la traza de una falla activa (Kerr et al., 2003), siempre y cuando la información sobre la ubicación de la falla sea confiable, o en California (USA), donde la distancia a considerar ha variado a lo largo del tiempo y en función de la certeza geológica de la traza, considerándose en los primeros mapas (antes de 1977) una distancia de 200 metros alrededor de una falla activa, variando a 150 metros en el caso de las fallas medianamente definidas y entre 60 a 90 metros en la caso de fallas bien definidas. En el caso de Chile, Mardones et al (2001), considera como factor para la evaluación del riesgo sísmico en áreas urbanas de Concepción la cercanía a una falla a más de 200 metros, entre 100 y 200 y menos de 100 metros.

Particularmente en este estudio se sugiere la división en franjas paralelas a la falla de ancho 100 metros, considerando la distancia estándar que existe entre cuadras (manzanas) y el área cubierta en el caso de aplicación (capítulo 7), pudiendo ser ajustada a otros requerimientos. Los límites de las unidades de análisis en el sentido del rumbo de la falla, quedarán definidos por los límites urbanos de la zona de interés en el caso que la traza se extienda por fuera del área de estudio, o bien ser incluidas como una unidad adicional en aquellos casos en que la traza de la falla quede completamente acotada dentro del área de análisis.

#### 4.2.2 FACTORES CONDICIONANTES Y PONDERADORES PROPUESTOS

A continuación se describen los factores condicionantes a evaluar para determinar la susceptibilidad de posible respuesta sísmica de terrenos urbanos ante la presencia de fallas mayores, y los aspectos considerados en cada uno.

- **Daño (F1).** La medición y catastro de daños causados por un sismo resulta una información fundamental para estudios de riesgo y microzonificación sísmica, existiendo más de una escala que permite evaluarlos y compararlos. Se cita como ejemplo, la escala de Mercalli Modificada (IMM) y la escala M.S.K. (Medvedev et al., 1964 en Monge y Astroza, 1989), ambas graduadas en 12 niveles, y que se obtienen a partir de los daños que se producen en las viviendas de la ciudad luego de producido un sismo de gran magnitud. La diferencia entre ambas, radica en que la escala M.S.K. incorpora en la estimación del daño de distintas viviendas según el tipo de construcción, separándolas por vulnerabilidad.

En el caso particular del presente estudio, y considerando que el objetivo final es definir susceptibilidad de respuesta sísmica asociadas a fallas y no una microzonificación sísmica, la recopilación de información de daños se refiere al registro a edificaciones de cualquier tipo que hayan presentado un deterioro mayor por sismos importantes registrados en el área de estudio (independiente del tipo de sismo), y puede obtenerse mediante estudios anteriores (de riesgo sísmico, microzonificación sísmica, catastros municipales, entre otros), información de prensa, registros históricos o bien a partir de observaciones en terreno. La ponderación se basa en la presencia de edificaciones con daño estructural, colapso evidente, peligro de derrumbe o desalojo por parte de las autoridades.

- **Evidencias geológicas y geomorfológicas de terreno (F2).** El segundo condicionante ponderado toma en cuenta los datos obtenidos en terreno (Etapa 2) que pretenden validar la información referida a la existencia de la falla (o fallas) en el área de estudio y su posible actividad reciente. Particularmente se evalúa evidencias de su existencia (como reconocimiento de traza en afloramientos, presencia de brecha de falla o zona cizallada, planos estriados, entre otras) y evidencias de posible actividad reciente (como deformación asociada a la falla en depósitos post-miocenos, deformación en suelos cuaternarios, entre otros). Se debe resaltar que la sola observación de posibles desplazamientos en depósitos recientes no es suficiente para definir si una falla es activa o no.
- **Distancia de la unidad respecto a la traza (F3).** A partir de las unidades de análisis definidas (para este trabajo de ancho 100 metros) en forma paralela y longitudinal a la traza, se evalúa la distancia que existe entre las distintas unidades y la traza de la falla, considerando como base si la estructura atraviesa la unidad o se encuentra en las unidades inmediatamente aledañas. Para ello, los rangos considerados son de menos de 50 metros entre la traza y la unidad (falla atraviesa unidad), entre 50 y 150 metros (falla atraviesa unidades inmediatamente aledañas), entre 150 y 250 metros (falla atraviesa la zona en menos de dos unidades de distancia) y más de 250 metros (fallas a más de 2 unidades de distancia).
- **Antecedentes (F4).** Este factor evalúa los aspectos recopilados en la Etapa 1 de trabajo (recopilación de antecedentes y publicaciones anteriores), evaluando por un lado la existencia de información geológica y geomorfológica oficial y publicaciones anteriores que indiquen la existencia de la falla, y por otro lado, la existencia de antecedentes sísmicos en los cuales se sugiera actividad actual, evaluando la existencia de publicaciones o antecedentes de actividad sísmica difusa en el área de estudio (información obtenida a partir de catálogos sísmicos públicos, como el del Servicio Sismológico de la U. de Chile) y el National Earthquake International Center (NEIC). Como el problema planteado es estimar la susceptibilidad, los ponderadores se basan en la existencia y número de publicaciones o la existencia de antecedentes no publicados.
- **Deformación en superficie (F5).** Este condicionante evalúa la existencia de antecedentes o evidencias de deformación en superficie en las distintas unidades de análisis después de un sismo de importancia (como por ejemplo ruptura de terrenos, presencia de grietas, deformación de pavimentos, desplazamiento de superficie o en

infraestructuras) y cuya ponderación se basa en la existencia de antecedentes o evidencias claras, antecedentes no publicados, la ausencia de antecedentes o antecedentes publicados que descarten la deformación. Este último escenario disminuye la susceptibilidad (ponderador negativo).

Los ponderadores considerados para cada condicionante y su desglose se presentan en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1.**  
**Factores máximos considerados para evaluar susceptibilidad por fallas mayores**

FACTOR	% máx.	DESGLOSE DE FACTORES	% máx.
DAÑO (F1)	30	Daños por último sismo importante	15
		Daño registrado por sismos históricos	15
EVIDENCIAS GEOLÓGICAS Y GEOMORFOLÓGICAS DE TERRENO (F2)	30	Evidencias de terreno de la existencia de la falla en la unidad	20
		Evidencias de terreno de posible actividad reciente	10
DISTANCIA DE LA UNIDAD RESPECTO A LA TRAZA(S) (F3)	20	Ubicación y distancia de la traza(s) de la falla(s) con respecto a la unidad	20
ANTECEDENTES (F4)	10	Antecedentes Geológicos	3
		Antecedentes Geomorfológicos	3
		Antecedentes Sísmicos	4
DEFORMACIÓN EN SUPERFICIE (F5)	10	Antecedentes de deformación en superficie con sismos importantes	10

En la Tabla 4.2 se presenta el desglose de los distintos factores con sus respectivas especificaciones y rangos considerados en cada caso. El índice de susceptibilidad de respuesta sísmica por presencia de fallas en áreas urbanas quedará finalmente calculado como:

$$IS_{fallas} = F1 + F2 + F3 + F4 + F5$$



**Tabla 4.2.**  
**Desglose de factores y peso (en %) para cada rango**

FACTOR	% máx.	DESGLOSE DE FACTORES	% máx.	ESPECIFICACIONES	RANGOS	%
DAÑO (F1)	30	Daños por último sismo importante	15	Considerar a partir del último sismo de importancia registrado la presencia de edificaciones en la unidad que presenten: daño estructural y/o colapso o peligro de derrumbe y/o orden de desalojo	Más de una edificación con daño estructural, colapso, peligro de derrumbe y/o desalojo	15
					Al menos una edificación con daño estructural, colapso, peligro de derrumbe y/o desalojo	10
					Sin antecedentes	4
		Daño registrado por sismos históricos	15	Considerar a partir de los grandes sismos históricos registrados si se cuenta con datos de daño intenso o colapso de estructuras en la unidad o en el área	Ninguna edificación en la unidad con daño estructural, colapso, derrumbe y/o desalojo	0
					Registro de daño en la unidad en base a información escrita y datos registrados	15
					Registro de daño en el área en función información escrita (no específica a la unidad)	10
Registro de daño en el área a partir de fuentes de información informal (oral u otra)	4					
Sin antecedentes	2					
EVIDENCIAS GEOLÓGICAS Y GEOMORFOLÓGICAS DE TERRENO (F2)	30	Evidencias de terreno de la existencia de la falla en la unidad	20	Evaluar si existen antecedentes de terreno que permitan validar la existencia de la falla, como por ejemplo presencia de planos de falla, brecha de falla, salbanda, zonas de cizalle y planos estriados, mala calidad del macizo rocoso, u otro en la Unidad	Existencia de evidencias de terreno	20
					Sin evidencias de terreno	2
		Evidencias de terreno de posible actividad reciente	10	Evaluar si existen antecedentes que permitan sugerir o validar actividad reciente en la falla, como escarpes recientes, grietas en superficie, deformación del suelo, otros en la Unidad	Existencia de evidencias de terreno	10
					Sin evidencias de terreno	1
DISTANCIA DE LA UNIDAD RESPECTO A LA TRAZA(S) (F3)	20	Ubicación y distancia de la traza(s) de la falla(s) con respecto a la unidad	20	Considerar si la unidad es atravesada por una o varias trazas de la falla o la distancia que existe entre la traza(s) y la unidad	Traza(s) de falla(s) a menos de 50 metros de la unidad de análisis	20
					Traza(s) de falla(s) entre 50 y 150 metros de la unidad de análisis	10
					Traza(s) de falla(s) entre 150 y 250 metros de la unidad de análisis	5
					Traza(s) de falla(s) a más de 250 metros de la unidad de análisis	1
					Más de una publicación y/o más de una traza definida	3
ANTECEDENTES (F4)	10	Antecedentes Geológicos	3	Evaluar si existen antecedentes de publicaciones y mapas geológicos que indiquen la presencia de la falla y/o trazas en la unidad	Sólo una publicación incluyendo traza(s)	2
					Sin antecedentes	1
					Existencia de más de una publicación o mapas geomorfológicos que indiquen o sugieran la existencia de la falla	3
		Antecedentes Geomorfológicos	3	Evaluar si existen antecedentes geomorfológicos publicados que indiquen la presencia de la falla (y/o trazas) en la unidad.	Sólo una publicación que sugiera antecedentes geomorfológicos de la traza(s)	2
					Sin antecedentes	1
					Antecedentes de sismicidad difusa en el área de estudio en el entorno a la falla (catálogos sísmicos)	4
		Antecedentes Sísmicos	4	Evaluar si existen antecedentes sísmicos publicados o no que sugieran actividad actual	Antecedentes sísmicos publicados que sugieran actividad reciente de la falla	2
					Sin antecedentes	1
					Evidencias claras y/o antecedentes publicados de deformación en superficie de la unidad a causa de sismo	10
DEFORMACIÓN EN SUPERFICIE (F5)	10	Antecedentes de deformación en superficie con sismos importantes	10	Evaluar si existen antecedentes (publicados u observados en terreno) de deformación en superficie producto de un sismo (como grietas de tensión, hundimientos, deformación del pavimento, etc.)	Antecedentes informales o no publicados de deformación superficial en la unidad por sismo en la unidad	5
					Sin antecedentes	1
					Antecedentes publicados de la inexistencia de deformación en superficie producto de sismo	-5

#### 4.2.3 ALCANCES DE LA METODOLOGÍA

Como se ha mencionado anteriormente, la metodología propuesta está orientada solamente a evaluar susceptibilidad de respuesta sísmica por fallas mayores en áreas urbanas, lo que permite en una primera etapa definir si resulta interesante profundizar en estudios sísmicos y estructurales de la falla, así como dar respuesta a los requerimientos legales en Chile (específicamente la O.G.U.C., artículo 2.1.17) de manera fácil, ya que en esta etapa no se requieren ensayos o mediciones de suelo, debido a que los factores condicionantes ponderados se basan básicamente en antecedentes y observaciones geológicas.

La metodología propuesta no diferencia entre fallas activas o inactivas. Su aplicación y resultados pueden alertar sobre zonas más sensibles a sufrir una respuesta sísmica mayor por la presencia de fallas, lo que se traduce en una necesidad de estudios sísmicos y estructurales más profundos.

Dentro de los factores evaluados, no se incorporan las diferencias geológicas-geotécnicas de los terrenos, propiedades mecánicas y sísmicas de los suelos, ni tampoco la geología superficial donde se hacen las construcciones (primeros 30 metros bajo superficie), dado que no está en los objetivos evaluar la respuesta sísmica en función de las propiedades de los suelos (o efecto de sitio) ni tampoco hacer una microzonificación sísmica.

## CAPITULO 5. AREA DE ESTUDIO DE CASO VIÑA DEL MAR – V REGIÓN CHILE CENTRAL

### 5.1 UBICACIÓN GENERAL Y ACCESOS

La comuna y ciudad de Viña del Mar, se ubica en la provincia de Valparaíso, V región costa, en las coordenadas 33°01' latitud Sur y 71°33' longitud Oeste (a 120 km al noroeste de Santiago y 8 km al norte de la comuna de Valparaíso) siendo conocida por ser una de las ciudades balnearios más importantes de la zona central de Chile (Ver Figura 5.1). Su demografía según el Censo del año 2012, indica que tiene 286.931 en una superficie de 122 Km<sup>2</sup>, y una densidad poblacional de 2.402,99 Habitantes/Km<sup>2</sup>.

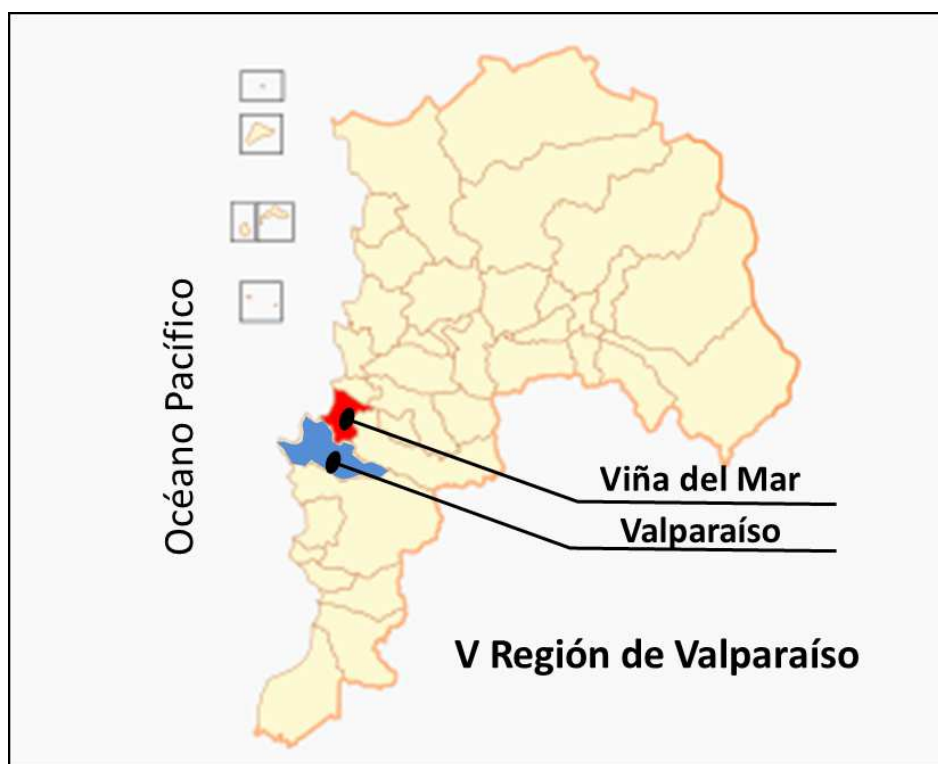


Figura 5.1. Ubicación de la Comuna de Viña del Mar en la V Región.  
Fuente: <http://www.wikipedia.org/>

La conectividad entre la ciudad de Viña del Mar y la Región Metropolitana, es por la ruta Ruta 68, accediendo a la ciudad por la vía Agua Santa o Ruta 60 (Camino Las Palmas). Internamente, la ciudad de Viña del Mar conecta a través de rutas concesionadas y calles principales con Valparaíso (al sur) por Av. España, Concón (norte) por camino costero (Av. Borgoño) y ruta interior (camino Concón – Reñaca) y Quilpué (este) con Camino Troncal interior o ruta concesionada (Autopista Troncal Sur).

## 5.2 MARCO GEOMORFOLÓGICO

### 5.2.1 ANTECEDENTES

Geomorfológicamente, la V región se caracteriza por presentar tres zonas en sentido longitudinal (ver Figura 5.2). De este a oeste se reconocen la franja oriental, con pendientes abruptas generadas por la presencia de macizo cordillerano andino (Cordillera de los Andes), mientras que el tercio central de la región se caracteriza por una mezcla proporcional de pendientes fuertes y pendientes suaves. Las primeras asociadas a la Cordillera de la Costa (de lomas bajas y onduladas) y cordones transversales, y las segundas se generan en fondos de valles rellenos con depósitos aluviales provenientes de sectores altos.

El sector occidental de la región, donde se ubica la zona de estudio, se caracteriza por presentar un relieve maduro y suave de formas llanas, caracterizado por pendientes más bajas que escasamente superan los 400 metros sobre el nivel del mar (Álvarez, 1964).

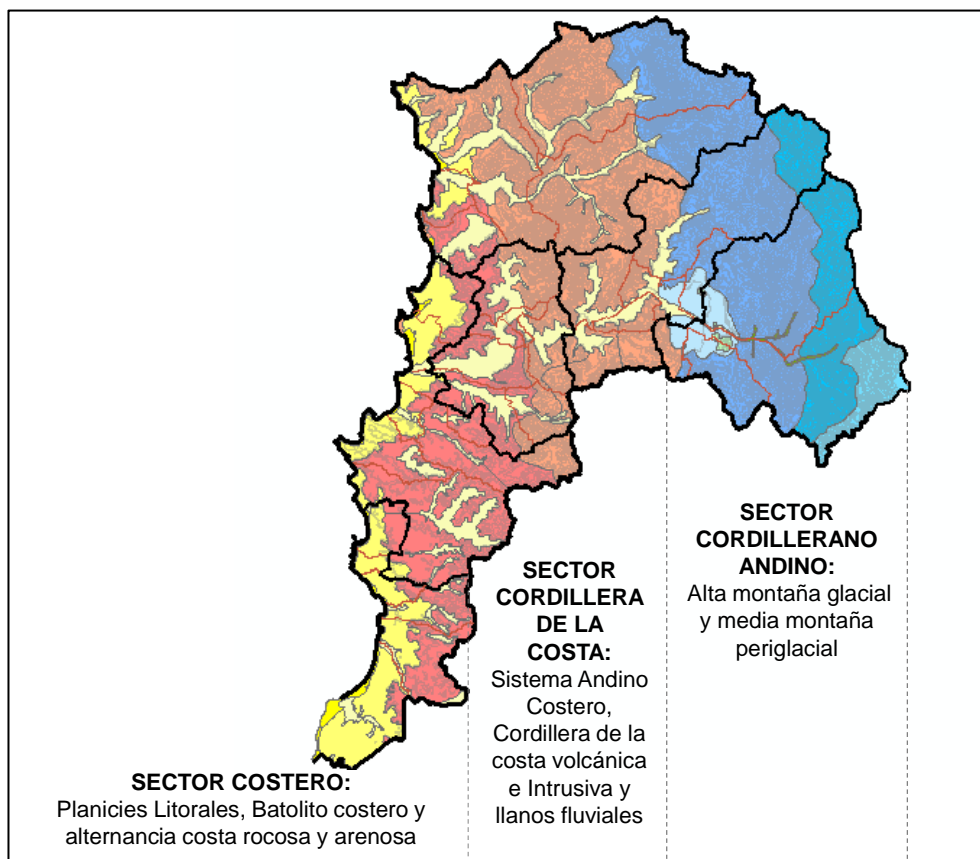
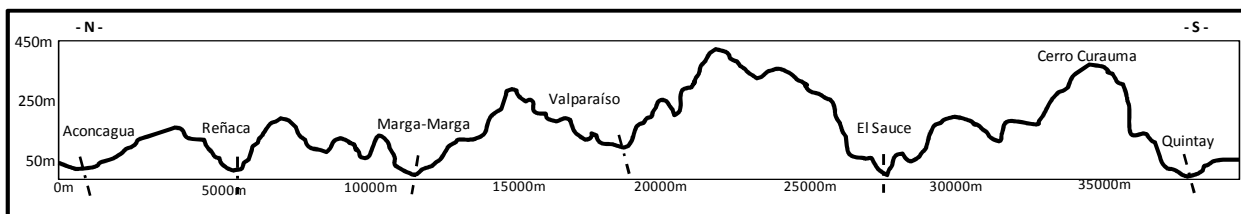


Figura 5.2. Unidades Geomorfológicas V Región de Valparaíso.  
Fuente: MINVU V Región - PRDUT

El tipo de relieve que se presenta en la franja occidental tiene formas llanas y ha sido interpretado como terrazas de abrasión marina (Álvarez, 1964), la cuales se intercalan a sectores con pendientes más o menos abruptas correspondientes a acantilados erosionados y zonas de quebradas. Esta morfología daría cuenta de una costa típica de transgresión y regresión marina, evidenciando cambios en el nivel del mar con formas características como terrazas de abrasión y ambientes de depositación (tipo delta y estuariales), junto evidencia de procesos de solevamiento y alzamiento tectónico (Álvarez, 1964).

Según Castro y Brignardello (1997) entre Concón y Quintay se reconocen tres niveles de terrazas de abrasión marina. Uno superior, entre 360 y 320 m s.n.m., uno intermedio entre los 280 y 230 m s.n.m. y uno bajo entre los 90 y 20 m s.n.m., mientras que en algunos sectores se podrían encontrar niveles intermedios que presentarían depósitos marinos y en ocasiones con alto contenido fosilífero. Es importante resaltar la dificultad que representa la correlación entre las terrazas en sentido longitudinal (N a S) a cada lado de las quebradas principales (ver Figura 5.3), y que han sido interpretadas como dislocaciones tectónicas que han sufrido en el cuaternario (Castro y Brignardello, 1997, y Álvarez, 1964), asociado a lineamientos estructurales noroeste que siguen el curso de las quebradas principales, las cuales siguen líneas rectas evidenciando un posible control estructural (ver Figura 5.4).



**Figura 5.3. Perfil morfológico de la costa entre Aconcagua y Quintay mostrando dislocaciones tectónicas generadas por fallas asociadas a quebradas**

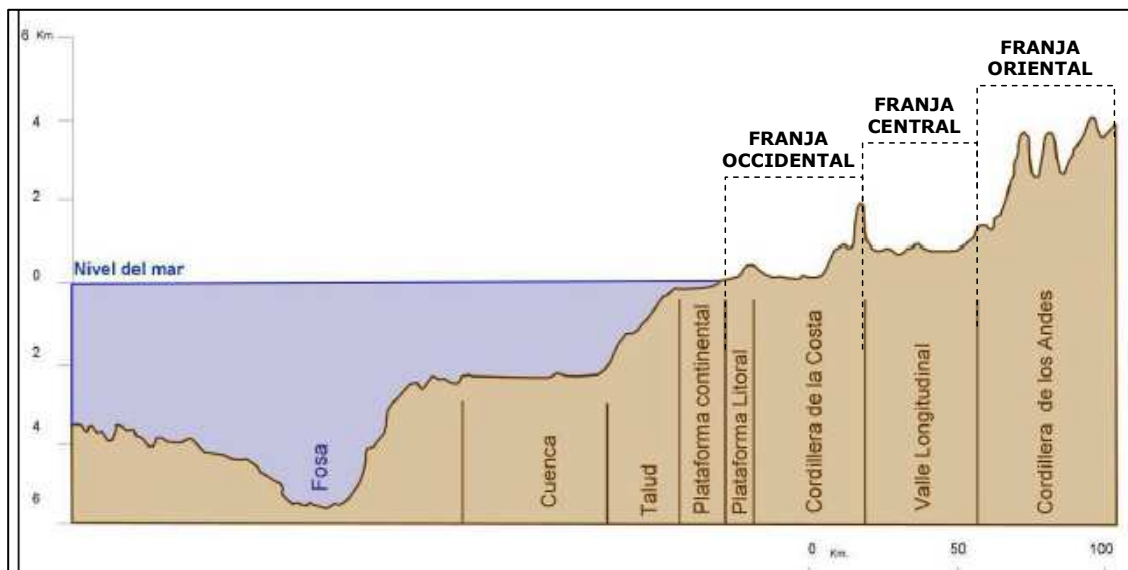
**Fuente: Geomorfología aplicada al Ordenamiento Territorial de la franja costera entre Concón y Quintay (Castro y Brignardello, 1997)**

Por otro lado, la línea de costa en la región no es recta. De norte a sur, el tramo entre Reñaca y Viña del Mar se presenta más bien recta con dirección norte sur a noreste, adoptando una geometría cóncava hacia el norte, con algunas puntas y bahías menores (sector Portales). Hacia Valparaíso la costa adopta la configuración de Bahía limitada al sureste por la punta del sector caleta Torpederas (Figura 5.4)



**Figura 5.4. Imagen satelital Google Earth de la zona de estudio.**  
**Fuente: Imagen Google earth modificada**

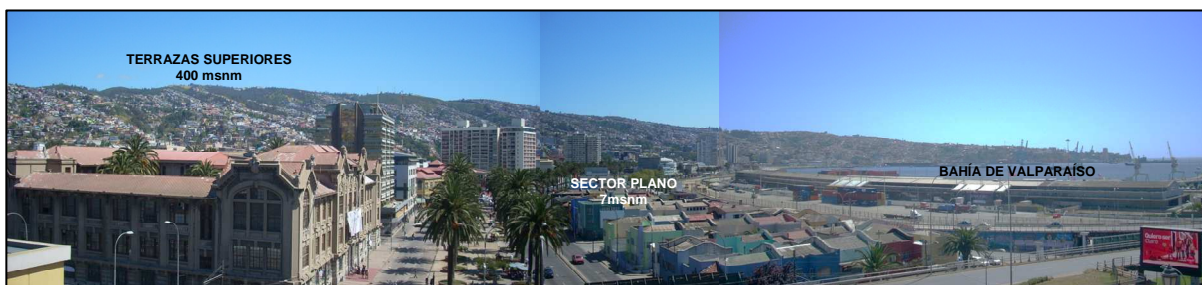
Siguiendo hacia el oeste, en la zona marina se reconocen la plataforma continental y los cañones submarinos (Figura 5.5). La primera presenta en la región escaso desarrollo (unos pocos kilómetros), mientras que de los cañones submarinos (que corresponden a grandes incisiones debido al ingreso de aguas continentales a través de las desembocaduras de ríos), el principal corresponde al cañón de San Antonio, al sur de la zona de estudio.



**Figura 5.5. Perfil geomorfológico V Región.**  
**Fuente: Modificado de Vergara 1996 (Informe en informe Diagnóstico Microzonificación borde costero. GORE Valparaíso, División de Planificación y Desarrollo. 2009)**

Específicamente, las comunas de Valparaíso y Viña del Mar forman parte de un sistema de depresiones costeras adosadas al borde occidental de la Cordillera de la Costa (Álvarez, 1964), con presencia de sectores planos actualmente ocupados por zonas urbanas (Lépez, 2005).

En el caso de la comuna de Valparaíso, su área urbana se encuentra emplazada alrededor de la bahía del mismo nombre, ocupando la parte inferior del territorio de la cuenca hidrográfica conformada por el conjunto de quebradas que drenan hacia la bahía. La franja costera objeto de la ocupación urbana parece corresponder a un remanente de una desgastada terraza de abrasión – depositación de tipo marina (de alturas promedio 7 m s.n.m.), que aumenta en altura a medida que se avanza hacia el oriente (Hauser, 2003). El plan de la ciudad de Valparaíso estaría construido sobre una antigua playa cubierta por relleno artificial y escombros (Grimme y Álvarez, 1964; Hauser, 2003). A partir del plan, la ciudad se ha extendido internándose por las quebradas y ocupando también los faldeos de los cerros que tienen características de acantilado, por lo que es posible encontrar terrazas o quiebres de pendiente significativos (ver Fotografía 5.1)



**Fotografía 5.1. Vista general bahía de Valparaíso mostrando sector plano (antigua playa cubierta por construcciones) y crecimiento de la ciudad hacia sectores altos (terrazas)**  
Fuente: Obtención propia.

La ciudad vieja de Valparaíso o casco urbano primitivo habría sido fundado hacia 1544, en una franja plana a una altura media de entre 10 y 15 m s.n.m. (Hauser, 2003). Cuando los terrenos planos fueron ocupados, fue necesario el relleno de los sectores llanos para emparejamiento con materiales artificiales, entre los cuales se cita variados tipos de suelos provenientes de cortes, escombros de demoliciones, trozos de madera, hormigón, ladrillo, entre otros. Una vez ocupados los sectores planos, el crecimiento de la ciudad fue hacia los sectores altos dispuestos hacia el sur, donde el terreno se presenta con pendientes moderadas a altas ( $15^\circ$  a  $35^\circ$ ), conformando un plano regular, inclinado e interrumpido por una serie de cursos de aguas (quebradas, quebradillas) rectas, con mayor desarrollo por acción pluvial y que drenan las aguas hacia el mar.

Según Álvarez (1964), en el sector occidental de Valparaíso se reconocen nueve niveles de terrazas marinas, cuyos niveles bajos oscilan entre los 20 y 60 m s.n.m. y los niveles superiores estarían por sobre los 320 m s.n.m. Los niveles aterrazados no estarían cubiertos por depósitos sedimentarios (Álvarez, 1964) y la roca intrusiva jurásica sobre la cual están labrados los sistemas de terrazas está meteorizada y forma distintos horizontes amaicillados (Hauser, 2003). La inclinación en las laderas,

especialmente aquellas en cortes de roca, tienen ángulos que incluso llegan a los 60°-65° (Hauser 2003), mostrados a modo de ejemplo en la Fotografía 5.2.



**Fotografía 5.2: Vista laderas artificiales sector costero entre Valparaíso y Viña del Mar mostrando fuertes pendientes**  
Fuente: Obtención propia.

Hidrográficamente entre Valparaíso y Viña del Mar se reconocen múltiples cuencas de tipo local, que encausadas llegan a los sectores llanos costeros y que drenan los cursos (en su mayoría esporádicos) hacia las zonas planas (Figueroa et al., 1997).

Las numerosas quebradas que desembocan en la parte llana de Valparaíso se disponen en forma aproximadamente radial, provenientes de 6 cuencas hidrográficas importantes que drenan hacia los sectores centricos: Cajilla – Clave; Tomás Ramos; Cumming – Almirante Montt; Ferrari, Av. Francia y Las Zorras. En general estas quebradas se presentan profundas, escarpadas y rectas (Lépez, 2005). Esta forma plana de la ciudad de Valparaíso en forma semicircular y cóncava hacia el norte, entre cerro Barón por el este y punta ángeles por el noroeste (Hauser, 2003) sumado a los cerros que hidrográficamente drenan hacia la ciudad, le da un aspecto de antiteatro (Lépez, 2005). Hacia el norte, las quebradas que separan los cerros Recreo, Esperanza, Placeres y Barón presentan dirección noroeste y mayores profundidades en las proximidades de su desembocadura (Lépez, 2005) que directamente hacia borde costero.

En tanto la comuna de Viña del Mar, presenta tres unidades geomorfológicas principales dadas por su relieve: el fondo de valle, los niveles aterrizados y los cerros de la Cordillera de la Costa hacia el este. El fondo de valle corresponde a la llanura que ocupa el centro de la ciudad y se encuentra atravesada por el estero Marga-Marga, y que correspondería en una terraza aluvial entorno al estero con alturas medias de 6,5 a 9 m s.n.m. (Thorson, 1999) Los límites de esta unidad al norte y al sur son cerros con altitudes variables correspondientes a terrazas litorales o terrazas de abrasión marina.



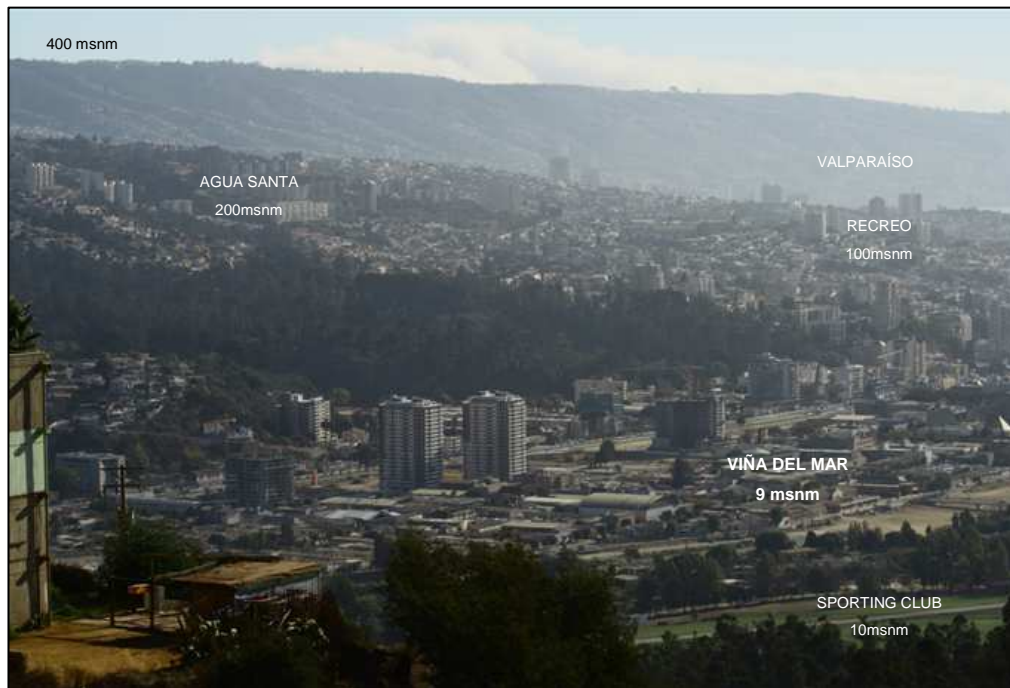
En cuanto a los niveles aterrizados, corresponden a superficies relativamente planas disectadas por profundas quebradas y zonas de erosión. Los niveles aterrizados a ambos lados del estero Marga-Marga son discordantes entre sí, exhibiendo distintas alturas a ambos lados (Álvarez 1964). Al noreste del estero predomina una terraza de gran extensión ubicada entre los 200 y 240 m s.n.m. identificándose además algunos remanentes de otros niveles de terrazas (uno a los 380 m s.n.m. y otro a los 450 m s.n.m.) que emergen como cerros aislados (ver Fotografía 5.3). La terraza principal se muestra como una superficie más o menos llana (siendo de tipo abrasión marina) encontrándose sólo escasos depósitos sedimentarios sobre ella restringidos al margen noreste del estero (Álvarez 1964).



**Fotografía 5.3. Vista global morfología tipo terrazas sector norte estero Marga-Marga**  
**Fuente: Obtención propia**

Al sur del estero Marga-Marga, los niveles aterrizados son más altos (ver Fotografía 5.4), ubicándose la terraza principal a cotas superiores a 250 m s.n.m. alcanzando más de 450 m s.n.m. al sur de Valparaíso.

Al norte de la comuna, específicamente en el balneario de Reñaca, el sector céntrico se emplaza en un valle con orientación EW atravesado por el Estero del mismo nombre y los cerros que rodean el Estero tienen altitudes variables entre 100 y 200 m s.n.m. y los niveles de erosión son menores debido a los menores niveles de urbanización (Fotografía 5.3).



**Fotografía 5.4. Vista global morfología tipo terrazas sector sur estero Marga-Marga**  
**Fuente: Modificada de Google earth**

Hacia el norte, en el tramo entre Reñaca y la comuna de Concón se desarrolla una zona de lomaje con pendientes más suaves en zonas de dunas y un acantilado costero rocoso de fuertes pendientes. Si bien en los antecedentes recopilados se indican menores niveles de erosión hacia el sector de Reñaca, en los últimos años el crecimiento inmobiliario ha generado una fuerte intervención de los sectores de dunas, generando la deforestación y reactivación de las dunas (ver Fotografías 5.5 y 5.6).



**Fotografías 5.5 y 5.6. Izquierda (5.5): Vista al sur de sector Reñaca indicando morfología de bahías y acantilados con sectores altos planos en dunas, con fuerte desarrollo inmobiliario. Derecha (5.6): Vista sector Reñaca – Concón evidenciando acantilado costero de fuertes pendientes rocoso y sector dunario con zonas de remoción de vegetación con fines inmobiliarios**  
**Fuente: Obtención propia**

Como se mencionó anteriormente, los cursos de agua de la comuna siguen líneas rectas, especialmente los esteros Reñaca y Marga-Marga. En términos hidrográficos, la mayor cuenca de la comuna de Viña del Mar es la alimentadora del estero Marga-Marga, que se extiende hacia el sureste de la zona de estudio, incluyendo las localidades de Viña del Mar, Quilpué y Villa Alemana (Figueroa y Portal, 1997). La cuenca del estero Marga-Marga forma parte de las cuencas adosadas a la parte occidental de la Cordillera de la Costa, cuya parte central está disectada en sentido longitudinal por un angosto valle que da paso a una llanura aluvial de Viña del Mar, por donde escurre el estero. El límite de la cuenca del Marga-Marga se diluye hacia el sector de la población Vergara (desde 6 oriente con 7 Norte hasta el Casino de Viña) donde la superficie del terreno es plana y se han producido modificaciones por urbanización (Figueroa et al., 1997).

La prolongación del estero Marga-Marga desde el SW hacia el NW por donde atraviesa la ciudad de Viña del Mar, se conoce como estero Viña del Mar, y en su parte más proximal a la desembocadura (últimos 5 kilómetros) habría sido encausado en forma artificial mediante muros de hormigón (Figueroa et al., 1997) lo que genera además una rotación en su desembocadura en los últimos 2 kilómetros con orientación aproximada EW.

#### 5.2.2 MODELOS DE PENDIENTES Y ELEVACIÓN DIGITAL

La información topográfica del área de estudio fue recopilada en distintas entidades gubernamentales y municipales, e incluye:

- Cartografía SAF Viña del Mar (plano DWG con curvas cada 5 metros a escala comunal). Ilustre Municipalidad de Viña del Mar.
- Información topográfica segmentada (por tramos) empresa Chilquinta (curvas cada 5 metros).
- Base de datos topográfica de las comunas Valparaíso y Viña del Mar (Seremi Minvu).
- Archivos Zonal Valparaíso (1:10.000) Valparaíso – Viña del Mar. Concesión ESVL.
- Base de datos topográficas “Gran Valparaíso” – Seremi Minvu.
- Plano de Roles PRC Viña del Mar.
- Base de datos topográfica comuna de Valparaíso cada 1 metro.
- Base Topográfica Viña del Mar (curvas cada 5 metros), oficina de Catastro y Proyecto URB-AL, Dirección de Obras, Ilustre Municipalidad de Viña del Mar.

A partir de toda la información disponible, se generó una base de datos topográfica única con curvas cada 5 metros, con lo que se generaron modelos digitales de pendientes y elevaciones utilizando herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), específicamente el software ArcMap 10.0. Los modelos se generaron a partir de la topografía de la comuna utilizando las metodologías en base a la generación de imágenes de alta resolución (raster) y mapas hipsométricos. Ver Figuras 5.6 y 5.7. Los rangos de elevación escogidos para mostrar los resultados, se basan principalmente en las alturas de los distintos niveles aterrizados reconocidas en el área.

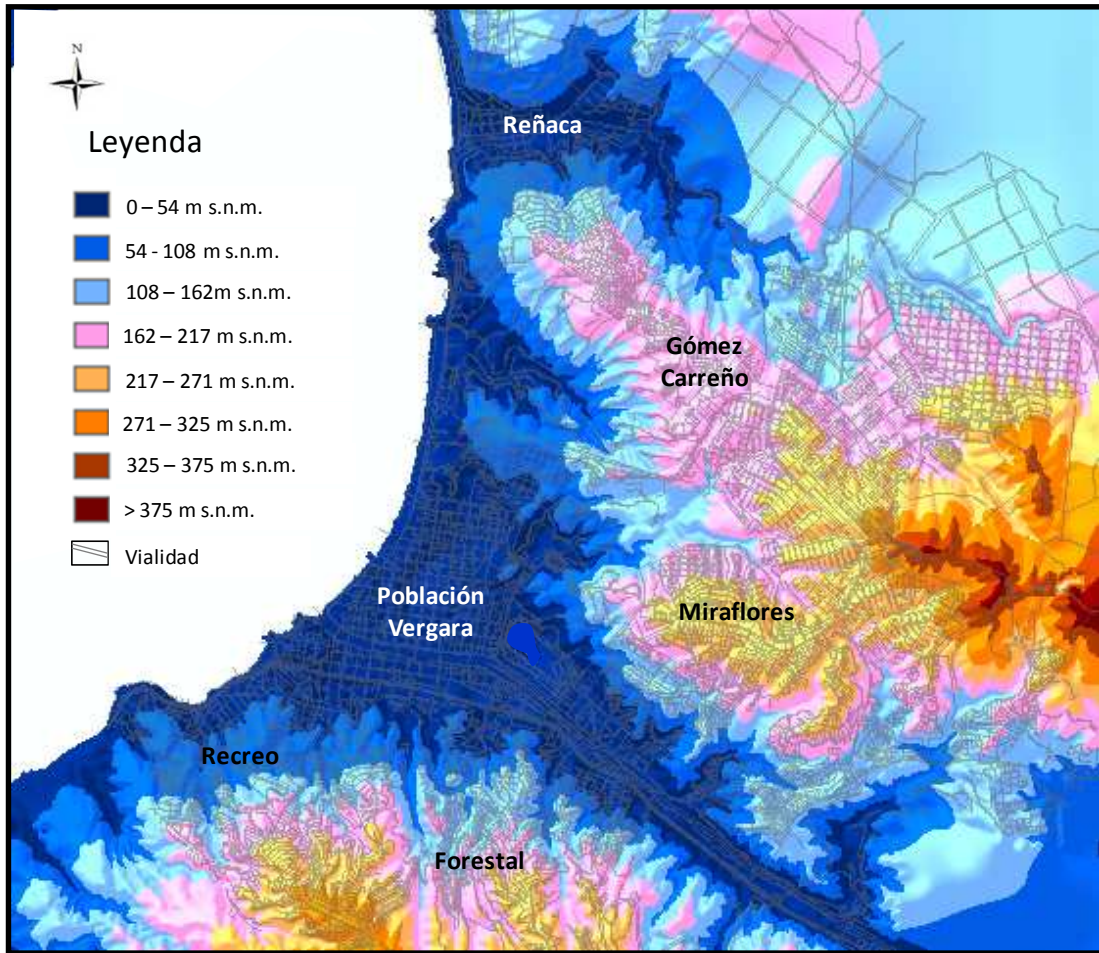
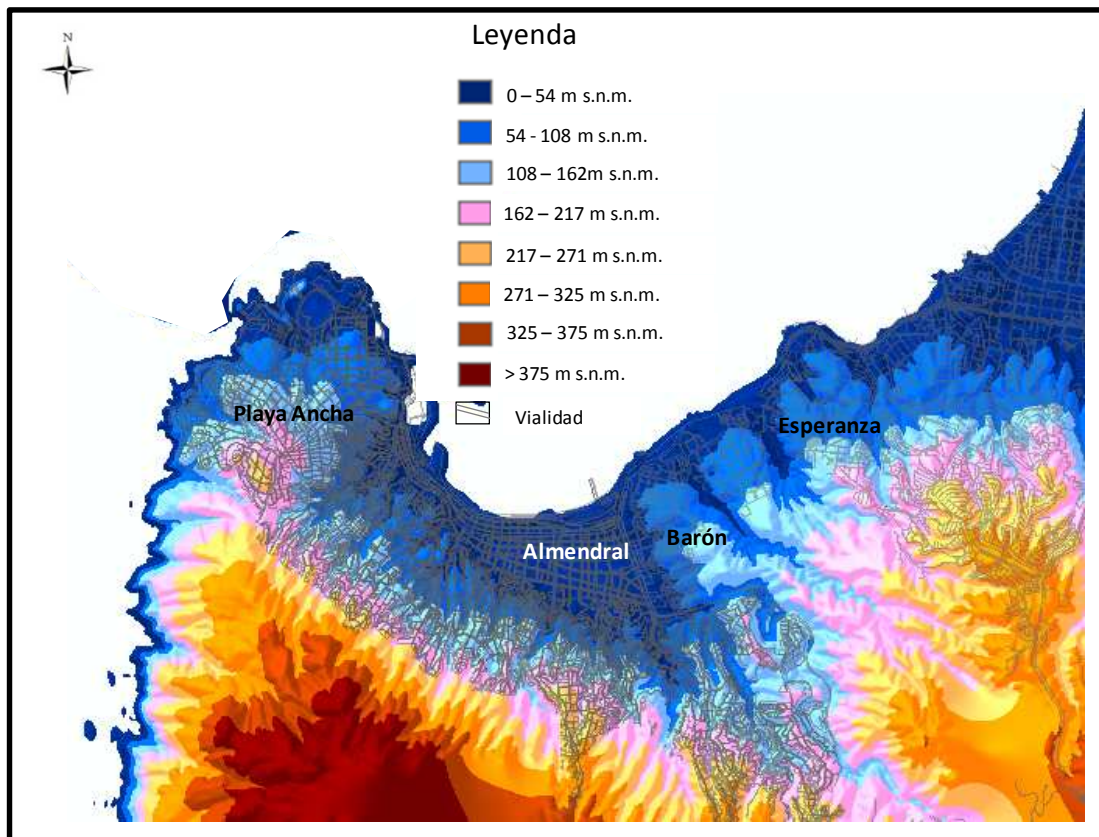


Figura 5.6. Mapa hipsométrico de Viña del Mar  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 5.7. Mapa hipsométrico de Valparaíso**  
**Fuente: Elaboración propia**

En las Figuras 5.6 y 5.7 es posible visualizar los sectores llanos y de baja altura del Plan de Viña del mar y Valparaíso, rodeado de pendientes mayores dispuestas en forma aterrazadas.

Las Figuras 5.8 y 5.9 muestran Modelos de Pendientes de ambos sectores, utilizando la clasificación basada en March (1978), en Aguiló et al (1993), y lo propuesto por Monett (1996): Pendiente muy fuerte ( $> 45^\circ$ ); Pendiente fuerte: entre  $30^\circ$  y  $45^\circ$ ; Pendiente moderada a fuerte: entre  $20^\circ$  y  $30^\circ$ ; Pendiente moderada: entre  $15^\circ$  y  $20^\circ$  y Pendiente suave:  $< 5^\circ$ . A partir de los modelos de pendientes mostrados en la Figuras 5.8 y 5.9, se valida la existencia de sectores planos y con pendientes suaves (colore verde) correspondiente a los niveles aterrazados, los cuales estarían intercalados por pendientes moderadas a fuertes (color amarillo, anaranjado y rojo) correspondientes a quebradas y acantilados costeros.

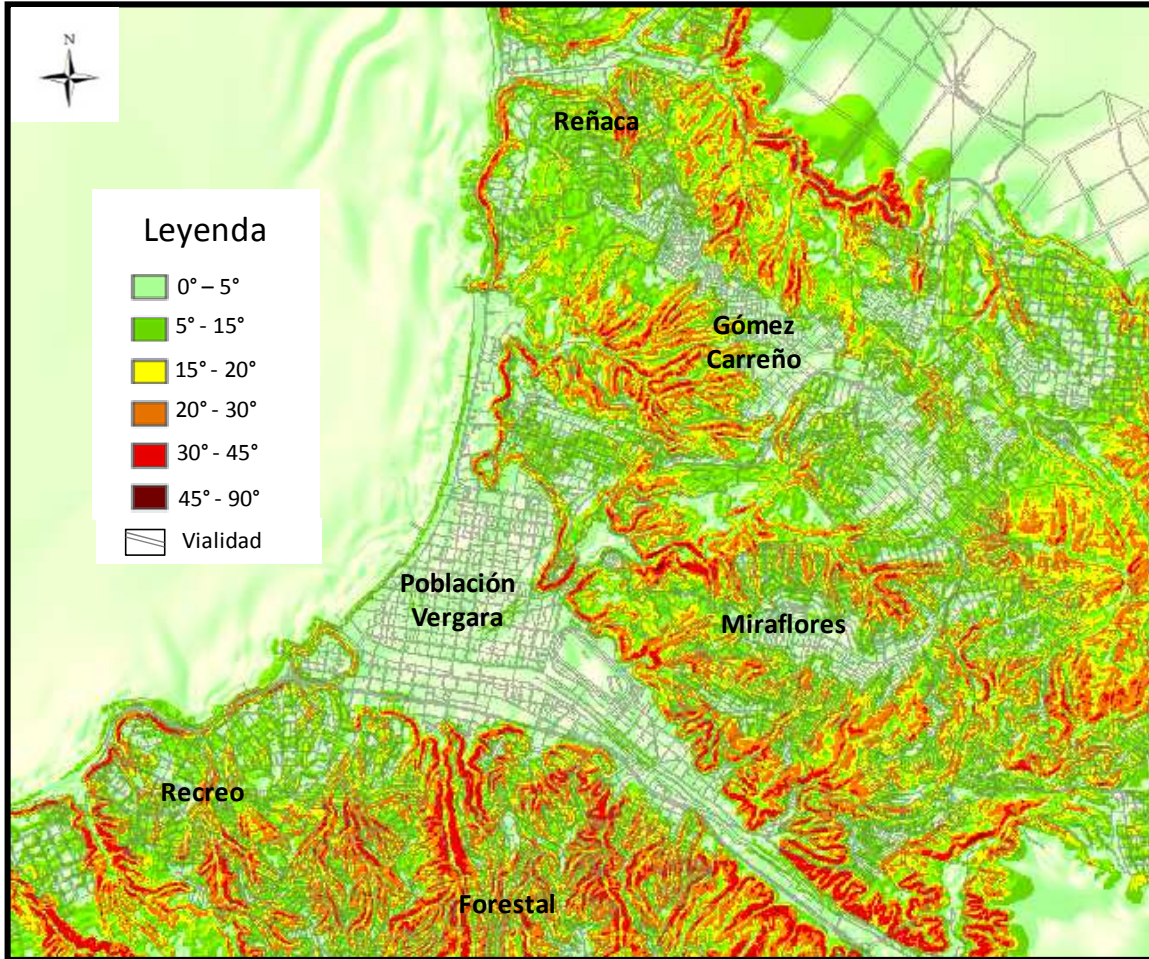


Figura 5.8. Mapa de Pendientes de Viña del Mar  
Fuente: Elaboración propia

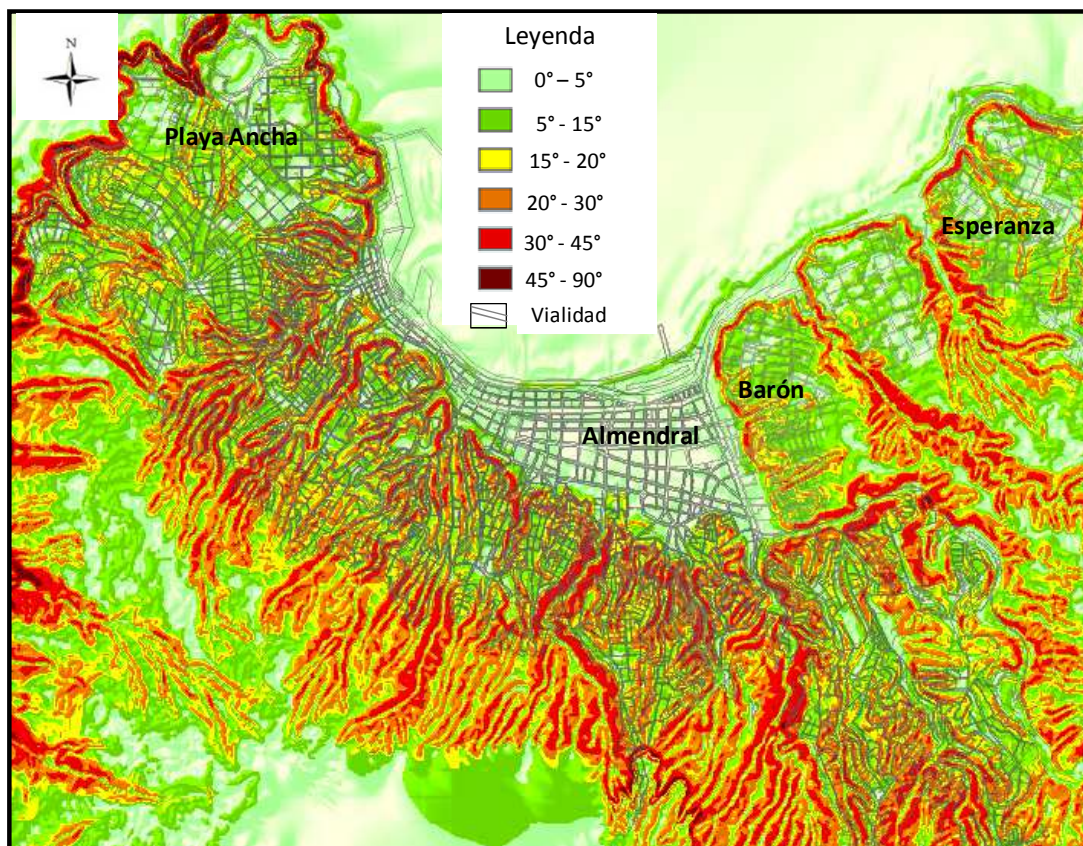


Figura 5.9. Mapa de Pendientes de Valparaíso  
Fuente: Elaboración propia

### 5.3 MARCO GEOLÓGICO

#### 5.3.1 ANTECEDENTES

El presente capítulo se basa en los trabajos de:

- Álvarez, 1964. Geología del área Valparaíso – Viña del Mar. Instituto de Investigaciones Geológicas (IIG) Chile, Boletín N.º 16
- Corvalán y Munizaga, 1972. Edades radiométricas de rocas intrusivas y metamórficas de la Hoja Valparaíso – San Antonio. Instituto de Investigaciones Geológicas, Chile. Boletín N.º 28.
- Gana et al., 1996. Mapa Geológico del Área de Valparaíso – Curacaví 1:100.000. SERNAGEOMIN
- Rivano et al., 1993. Carta Geológica de Chile Hojas Quillota Portillo escala 1:250.000. SERNAGEOMIN
- Sabaj, 2008. Identificación y caracterización de estructuras potencialmente activas en la cordillera de la costa, entre los 33° y 33°45' Sur. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología.
- Thorson, 1999. La falla “Marga-Marga” Viña del Mar – Chile. Departamento de Obras Civiles UTFSM.

- Toro, 2007. Influencia de las características geológicas en las propiedades geotécnicas de granitoides jurásicos y suelos asociados en la Ruta 68. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología.

A escala regional, geológicamente la Cordillera de la Costa y sectores costeros están constituidos por un basamento de rocas metamórficas e intrusivas del paleozoico y mesozoico, cubiertas en los sectores costeros por varios niveles de terrazas de abrasión subhorizontales, compuestas por sedimentos poco consolidados de origen marino y continental cenozoicos y sedimentos cuaternarios de origen fluvial, aluvial, eólico y marino.

Lo anterior, implica en términos geotécnicos la existencia de una diversa gama de materiales y rocas en la zona, que involucra rocas rígidas intrusivas y metamórficas, unidades de rocas meteorizadas y amailladas, arenas y depósitos semi consolidados a no consolidados, y unidades afectadas presencia de fallas geológicas.

Si bien existen diferencias entre los trabajos recopilados y analizados en términos de distribución de algunas unidades, nomenclatura y asignación de edades, lo cierto es que la disposición de los depósitos a escala comunal coincide en términos generales. Las Figuras 5.10 y 5.11 muestran la Geología propuesta por Álvarez (1964) y el Mapa Geológico Valparaíso-Curacaví (Gana et al., 1996).

A medida que se presente una descripción geológica de las distintas unidades, se irá asociando las diferentes fuentes de información. Cabe señalar que el Mapa Geológico de Valparaíso-Curacaví limita por el norte con el sector de Las Salinas en Viña del Mar, por lo que la información fue complementada hasta Reñaca con el Mapa Geológico del área Quillota Portillo (Rivano et al., 1996) escala 1:250.000 mostrado en la Figura 5.12.



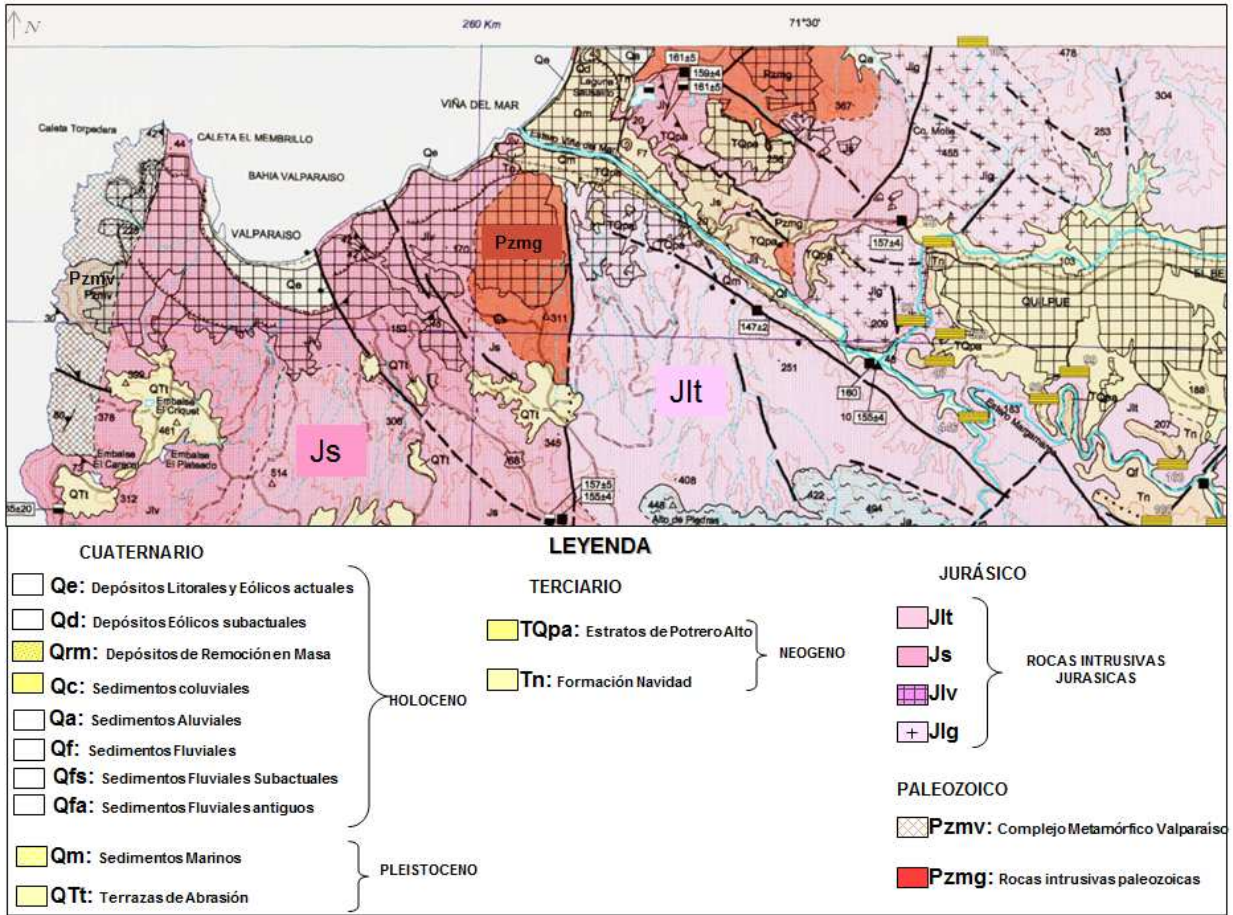


Figura 5.10. Imagen de Mapa Geológico Gana et al., (1996), sector Valparaíso y Viña del Mar. Escala 1:100.000

Fuente: Modificado de Gana et al., 1996.SERNAGEOMIN

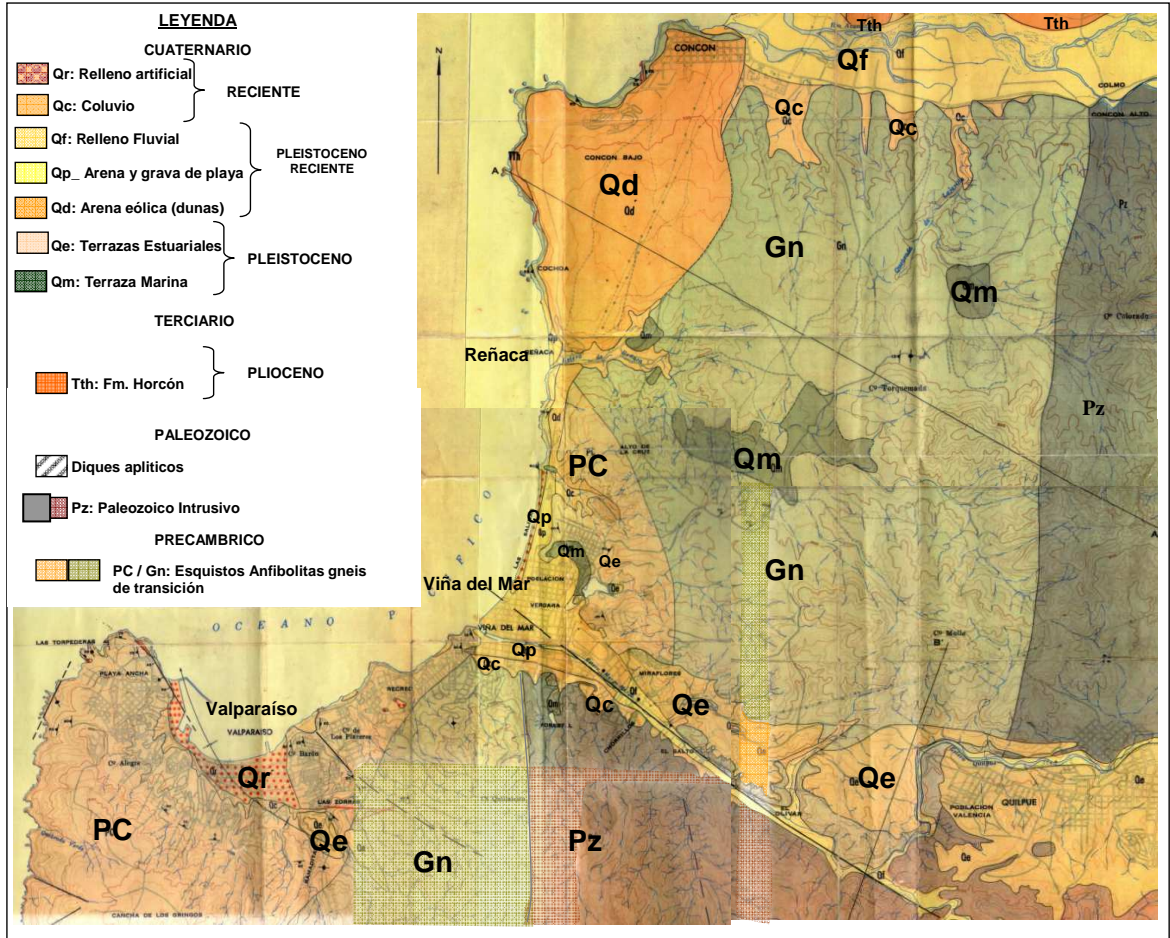


Figura 5.11. Imagen de Mapa Geológico Álvarez (1964), sector Valparaíso y Viña del Mar. Escala 1:50.000

Fuente: Modificado de Álvarez (1964). IGG Boletín N° 16

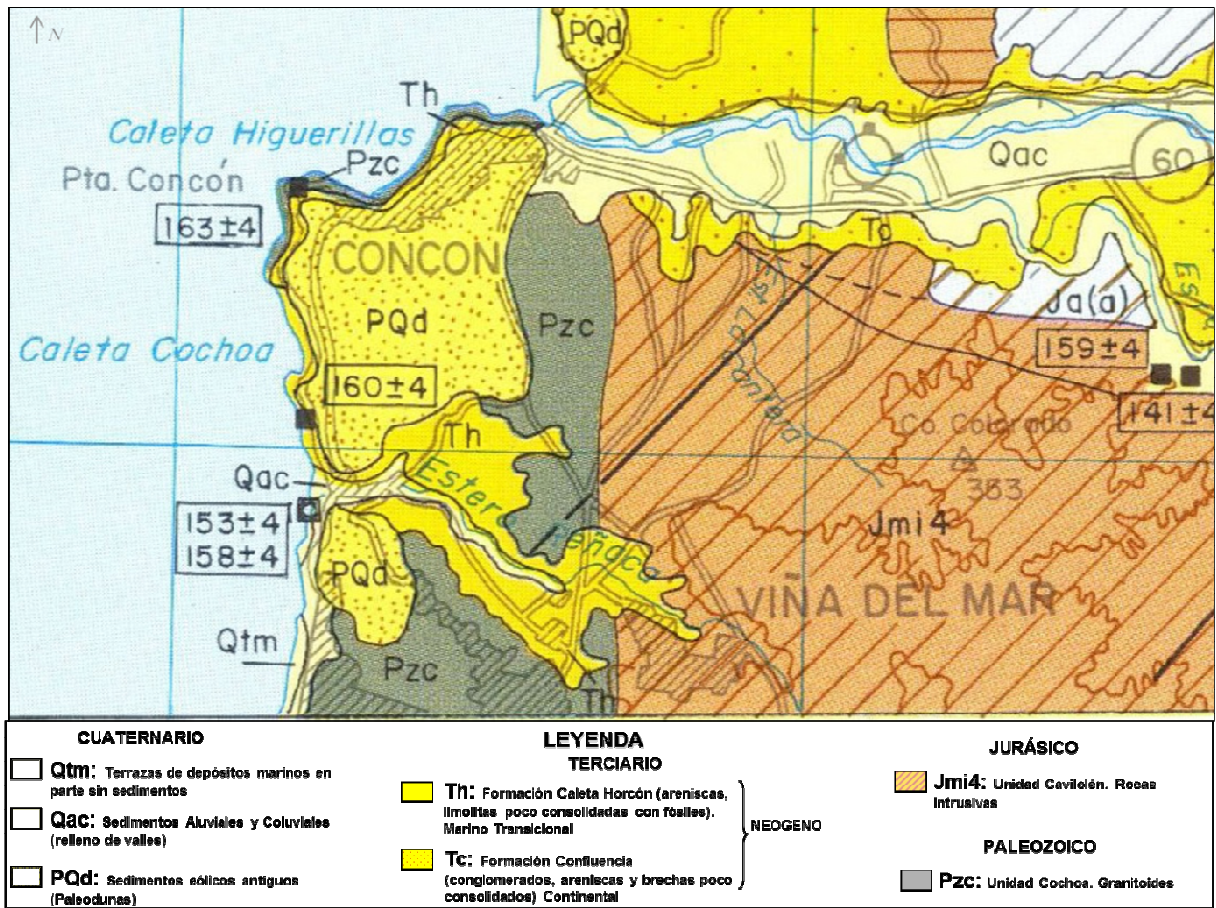


Figura 5.12. Imagen de Mapa Geológico Quillota Portillo, sector Reñaca. Rivano et al., 1993. SERNAGEOMIN. Escala 1:250.000  
 Fuente: Modificado de Rivano et al., 1993. SERNAGEOMIN

### 5.3.2 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

A continuación se presenta una descripción general de las unidades presentes en el área de estudio de más vieja a más joven, basándose en la información oficial más reciente (Gana et al., 1996, 1:100.000 de SERNAGEOMIN), sugiriendo posibles correlaciones entre distintas unidades definidas por las distintas fuentes de información consultadas:

**Complejo Metamórfico Valparaíso (Pzmv).** Achurado color café - en Figura 5.10, sector este de Valparaíso (Caleta Membrillo – Torpederas).

Esta unidad del paleozoico superior, corresponde a rocas metamórficas foliadas de protolito principalmente plutónico y sedimentario en menor proporción. Como se ve en la Figura 5.10, aflora como enclaves de longitud inferior a 2 km dentro de los complejos intrusivos de la zona costera. Se encuentra instruida por granitoides paleozoicos, entre los cuales se observan contactos graduales (en Quintay y Las Cruces), y gabros jurásicos al este de Valparaíso (Caleta Las Docas). Esta unidad no se encuentra registrada en los trabajos de Álvarez (1964), mientras que el Mapa Geológico de Rivano et al (1993) no se extiende a esta latitud sur.

A nivel regional, las rocas metamórficas presentan foliación principal noroeste-oeste con manteos hacia el sur; junto con pliegues similares de longitud de onda métrica a decamétrica con pequeñas zonas de cizalle dúctil que transponen la foliación principal (identificado en Las Cruces). Los enclaves metasedimentarios están inyectados por numerosas vetillas graníticas, de desarrollo ptigmático (Martin, comunicación escrita (1994) en Gana et al., 1996). Existen rocas de tipo ortogneises de similares características en la zona comprendida entre Cartagena y San Antonio (Wall et al., 1996), originalmente descritas bajo el nombre de Formación Quintay por Corvalán y Dávila (1963-1964, in Corvalán y Munizaga, 1972).

**Rocas intrusivas del Paleozoico (Pzmg).** Color rojo en Figura 5.10. Esta unidad corresponde a tonalitas, granodioritas y monzogranitos de anfíbola-biotita, sienogranitos y granitos de microclina. En general estas rocas se presentan con textura de grano grueso a medio y colores variables de gris medio verdoso, con inclusiones dioríticas a diorítica cuarcíferas, dispuestas paralelamente a la foliación magmática de la roca albergante. Es frecuente encontrar texturas alotromórfica granular con variedades gnéisicas y porfídicas. Poseen foliación magmática afectada por foliación tectónica no homogénea, que en algunos sectores en la región (Mirasol, Punta de Tralca) se evidencia por zonas miloníticas que contienen una lineación mineral de extensión.

A las rocas intrusivas paleozoicas se les sobre impone eventos de alteración magmática tardía en forma de parches y vetillas, lo cual en parte, contribuye al aspecto porfídico de estas rocas. Presentan además alteración regular a intensa de clorita, sericita, epidota y caolinita. En general son rocas de tipo calcoalcalinas, con 65-80% SiO<sub>2</sub>. Además están intruidas por diques básicos foliados y por plutones del Jurásico, con formación de zonas de enclaves magmáticos.

En el área de estudio, se reconoce esta unidad en el área sur de Viña del Mar, y hacia el norte hasta Reñaca (Figura 5.10). Esta unidad podría estar asociada con la unidad **Pzc** definida por Rivano et al., 1993, y mostrada de color gris de Figura 5.12. Además, se propone en este trabajo que esta unidad sería correlacionable con la unidad **GN** definida por Álvarez (1964), mostrada de color verdoso en Figura 5.11, sin embargo, Álvarez (1964) le asigna una edad precámbrica, lo que con datos actuales se concluye que es una datación incorrecta.

El contacto entre los intrusivos paleozoicos y los intrusivos jurásicos tendría orientación preferencial norte-sur, especialmente al sur del estero Marga-Marga donde este contacto sería coincidente con una quebrada rectilínea que desemboca frente a la plaza de Viña de Viña del Mar, atravesando la Quinta Vergara.

**Rocas intrusivas jurásicas.** La mayor parte de la V región central y norte está constituida por extensos afloramientos de rocas plutónicas de edad cercana a los 160 Ma. Estos incluyen una serie cuerpos de litología variable entre gabros y leucogranitos que muestran una distribución zonada en sentido oeste-este. La mayor parte lo constituye plutones heterogéneos o compuestos, que si bien pueden repetir litologías, el predominio de unas u otras definen una asociación cartográficamente identificable. Estas corresponden a las unidades Lliu-Lliu (Jll, Jlg), Limache (Jlg, Jlt), Peñuelas (Jpgb, Jpg, Jp), Sauce (Js) y Laguna Verde (Jlv) citadas en anteriores trabajos (Gana et al., 1996).

Se hará referencia a continuación específicamente a las unidades reconocidas en la zona de estudio entre Valparaíso y Viña del Mar (Gana, et al., 1996).

- **Js.** Rocas expuestas al suroeste de Viña del Mar y sur de Valparaíso, y mostradas de color rosado oscuro en Figura 5.10, correspondiente a un plutón complejo de composición básica a intermedia, predominantemente por rocas dioritas cuarcíferas de piroxeno-hornblenda-biotita, con tonalitas de hornblenda-biotita y gabros subordinados, que en ciertos afloramientos se presentan en forma de bandas alternadas de 1-3 m de espesor. Estas rocas son de color gris oscuro a medio, grano medio a fino, con texturas inequigranular seriada e intergranular en parte foliada de origen magmático y también tectónico. Contienen 45-60% SiO<sub>2</sub>, son de composición calcoalcalina, metaluminosa. Esta unidad presenta contactos graduales con intrusivos jurásicos Jlv y granitoides Jp.
- **Jlt.** Rocas expuestas al sureste de Viña del mar, color rosado claro en Figura 5.10. Se reconocen predominantemente tonalitas y granodioritas de anfíbola-biotita, apareciendo como rocas de color gris claro, grano medio a grueso, con escasas inclusiones microdioríticas subredondeadas (<1%) y textura hipidiomórfica granular. Son rocas de composición calcoalcalinas de K intermedio, 58-75% SiO<sub>2</sub>. Presentan contactos graduales con rocas de la unidad Jp. Intruyen a las formaciones Ajjal y Horqueta, generando en ellas, zonas de alteración hidrotermal.
- **Jlv.** Se muestran de color rosado intermedio de Figura 5.10, y afloran en el entorno de Valparaíso y sector norte de Viña. Corresponden a anfíbolitas, ortoanfíbolitas, gneises anfibólicos, dioritas y monzodioritas foliadas y gabros, apareciendo como rocas de color gris oscuro a medio, grano medio a fino, con frecuente foliación magmática y en parte dinámica (gnéisica y milonítica). Sus texturas varían desde granoblástica poligonal hasta inequigranular seriada, formada principalmente por hornblenda y plagioclasa suborientada paralelamente. Estas rocas constituyen plutones compuestos, de tamaño inferior a 16 km de largo, restringidos a la costa entre Laguna Verde y Punta Gallo. Esta unidad intruye a ortogneises y granitoides paleozoicos, originando zonas bandeadas y de enclaves magmáticos observables en Quintay (Gana et al., 1996). Además, presentan un contacto de tipo gradual con los granitoides Js en el sector de Laguna Verde, y se presentan intruídas por abundantes filones lamprofídicos y cuarcíferos.
- **Jlg.** Se muestran de color rosado claro de Figura 5.10, aflorando al sureste de Viña del Mar y en el entorno oeste y noroeste de Quilpué. Corresponden a monzogranitos de anfíbola-biotita, con variaciones granodioríticas. Son rocas leucocráticas, de color gris claro amarillento, grano grueso, textura hipidiomórfica granular, conteniendo plagioclasa zonada, anfíbola y ortoclasa poikilitica con cuarzo. Poseen un 70-75% de SiO<sub>2</sub>. Constituyen plutones circulares de 2-6 km de diámetro, intruyendo a tonalitas Jlt (Gana et al., 1996).

Las unidades intrusivas jurásicas definidas por Gana et al. (1996) podrían corresponder en parte a la unidad paleozoica **Pz** definida por Álvarez (1964), mostrada de color gris oscuro en Figura 5.11. Álvarez (1964) describió esta unidad como un plutón

granodiorítico y algunos cuerpos hipabisales (poco profundos) que cortan las rocas metamórficas y plutónicas, concordando en ambos casos que las variedades de rocas plutónicas varían de diorita y granito, siendo la más abundante la granodiorita gris clara, de textura granular y grano grueso.

Las rocas metamórficas e intrusivas descritas se encuentran atravesadas por diques, vetas y vetillas, los cuales se reconocen a lo largo de la costas y en afloramientos expuestos (especialmente en el sector entre Concón y Reñaca – Fotografía 5.7). Los diques de textura afanítica son oscuros, y presenta un fuerte control estructural noroeste de manteo al sur, mientras que las vetas y vetillas son claras (minerales de cuarzo y feldspato).



**Fotografía 5.7. Vista Norte de Diques afaníticos (oscuros) cortando unidades de rocas Intrusivas Paleozoicas**

**Fuente: Obtención propia sector Reñaca- Cochoa. Se destaca disposición preferente noroeste y manteos al suroeste**

**Rocas sedimentarias marinas semi consolidadas Terciarias. Formación Navidad (Tn).** Esta unidad asignada al Mioceno-Plioceno, entre 23 y 2,5 Ma (Darwin, 1846 en Gana et al., 1996) corresponde una secuencia sedimentaria marina fosilífera, medianamente consolidada, constituida por limolitas, areniscas arcillosas, areniscas de grano muy fino a muy grueso, bancos de conglomerados, areniscas muy finas grises, bancos de coquinas y calizas. Presenta fuertes variaciones verticales y laterales de facies y se dispone en contacto depositacional sobre granitoides paleozoicos (Pzmg) y cubierta por sedimentos eólicos, aluviales y suelos cuaternarios.

Presenta disposición general subhorizontal y posee una potencia máxima estimada en el área, de 170 m. Los estratos superiores engranan con depósitos continentales de la

unidad TQpa. En Gana et al. (1996) se describen en detalle las asociaciones faunísticas de los afloramientos atribuibles a la formación Navidad. En el área de estudio se reconocen afloramientos puntuales en Viña del Mar, en el entorno a calle 5 oriente con calle Quillota (detallados más adelante) y mostrados de color amarillo en Figura 5.10.

En términos de distribución y características, esta unidad podría ser homologable con la definida por Álvarez (1964) llamada **Qm (Terrazas marinas)**, mostrada en color verde oscuro en la Figura 5.11, y cuya edad fue asignada a Cuaternario. Ella es descrita como depósitos sedimentarios de color pardo-amarillento constituidos por materiales finos (arena fina y limo) con intercalaciones de gravas en algunos sectores. Esta unidad fue reconocida al este y suroeste de Reñaca, y algunos sectores céntricos de Viña (detallados más adelante) y que tendrían contenido fosilífero marino.

Hacia Reñaca, Rivano (1993) define la **Formación Caleta Horcón – Neógeno (Th)**, Plioceno superior (mostrada en la Figura 5.12 de color amarillo) y que correspondería a areniscas, arcillolitas y limolitas poco consolidadas con fósiles de ambiente marino – transicional.

Ambas unidades descritas (Tn y Th) tienen similar comportamiento geotécnico, descritas genéricamente como intercalaciones de areniscas, arcillolitas, limolitas con fósiles marinos poco consolidadas.

La evolución paleogeográfica durante el pleistoceno del borde continental desde la fosa hasta la Cordillera de la Costa Occidental, indica que sufrió un alzamiento lo que emerge depósitos batiales miocenos (Formación Navidad) hasta por sobre el nivel del mar (Farías, 2007 en Sabaj 2008). Este proceso parece estar activo aún, tal como lo muestra una de serie terrazas marinas emergidas de probable edad pleistocena ubicadas a lo largo de la costa (Farías, 2007 en Sabaj, 2008). Estos movimientos verticales se han estimado como independientes del vector de convergencia y fuertemente dependientes de la morfología de la placa subducida (dorsal asísmica de Juan Fernández) y de la estructura de la placa cabalgante (Lavenue, 2006 en Sabaj 2008).

**Rocas sedimentarias semi consolidadas Terciarias. Estratos de Potrero Alto (TQpa).** Mostrada en color amarillo de la Figura 5.10. Esta unidad del Mioceno? Plioceno-Pleistoceno? (Wall et al., 1996), corresponde a depósitos sedimentarios medianamente a poco consolidados de conglomerados, areniscas y limolitas con restos vegetales mal preservados. Predominan facies de tipo continental aluvial (cono aluvial, río, llanura de inundación), en parte transicionales, que engranan hacia el oeste con los estratos marinos superiores de la Formación Navidad. Estos estratos continentales, de disposición subhorizontal y potencias variables, desde escasos metros hasta aproximadamente 50 m, presentando contactos depositacionales sobre las unidades intrusivas paleozoicas y jurásicas. A su vez, se encuentran cubiertos por sedimentos aluviales y suelos cuaternarios.

Estos depósitos podrían relacionarse con la unidad **Qe (Terrazas Estuariales)** definida por Álvarez (1964), y que según su estudio serían sincrónicos con los sedimentos marinos descritos anteriormente (color naranja en Figura 5.11, inmediatamente el norte de estero Marga-Marga) y que se asocian a la parte más ancha y profunda de la

desembocadura de un río. En ambas fuentes de información, se verifica que esta unidad abarcaría una extensa área desde el Valparaíso Sporting Club hasta Villa Alemana por el este. Los materiales involucrados son arcillas, conglomerados de bolones y sedimentos tamaño arena. En las muestras recolectadas y descritas por Álvarez (1964), se observan granos angulares (cuarzo), con presencia de bolones y rodados de rocas graníticas. Sólo en algunos sectores se evidencia estratificación, en partes de aspecto torrencial. También existirían evidencias de deformación contemporánea a la sedimentación (manifestada por sobre corrimientos, deslizamientos y pequeñas fallas). La existencia de material de derrumbe coluvial sobre sedimentos fluviales, y engranajes entre sedimentos marinos y fluviales, indicarían un ambiente de tipo estuarial alternando condiciones marinas y fluviales.

En el caso de la zona norte, esta unidad podría estar asociada con la **Formación Confluencia (Tc)** definida por Rivano et al. (1993), de carácter continental y compuesta por conglomerados, areniscas, brechas y limolitas poco consolidadas de Mioceno – Plioceno (color naranja en Figura 5.12, entorno río Aconcagua), lo que debiese corroborarse con estudios geológicos más profundos.

En términos geotécnicos, la unidad TQP<sub>a</sub> (y sus posibles equivalencias con Q<sub>e</sub> y Th) presentan un similar comportamiento geotécnico, presentando algunas diferencias respecto T<sub>n</sub> y Th especialmente por las diferencias granulométricas que existen.

**Terrazas de abrasión cuaternarias (QTt).** Esta unidad mostrada en color amarillo claro en Figura 5.10 fue definida por Gana et al. (1996) y corresponde a unidades morfológicas de erosión marina asignadas al Plioceno (¿) – Pleistoceno (entre 5 y 0,02 Ma), labradas sobre intrusivos paleozoicos y jurásicos y las formaciones sedimentarias (T<sub>n</sub> y TQP<sub>a</sub>). Esta unidad está preservada en la zona costera, a cotas variables entre 40 y 550 m s.n.m. Dentro de esta unidad se incluyen terrazas de abrasión sin cubierta sedimentaria, terrazas cubiertas por arenas cuarzosas (posiblemente marinas) y terrazas con cubierta aluvial. Esta unidad se reconocería al sureste y suroeste de Valparaíso, no siendo singularizada por Álvarez (1964)

**Depósitos Marinos Cuaternarios (Qm).** Esta unidad representada en amarillo claro en Figura 5.10, con edades entre el Pleistoceno – Holoceno, corresponde a sedimentos no consolidados marinos a transicionales, constituidos por limos, arenas y gravas con niveles coquinoideos. Su morfología aterrazada se reconoce hasta 5 km al este de la costa actual, sin superar la cota de los 25 metros, y con contenido fosilífero (Gana et al., 1996). Esta unidad es similar en términos de composición y distribución con a la definida por Álvarez (1964) denominada **Qp (Cuaternario Playa)** consistente en Arenas y Gravas de Playa, la cual también es asociada a la Unidad **Qe** descrita por Gana et al., 1996.

**Depósitos litorales y eólicos actuales (Qe).** Esta unidad representada de color blanco en la Figura 5.10 corresponde a sedimentos recientes no consolidados (Holoceno, <10.000 años) de arenas y gravas de bolones bien redondeados, en los cuales predomina la estratificación plana horizontal y cruzada de bajo ángulo. Incluyen además láminas arenosas conformadas por concentración de minerales pesados, dunas activas compuestas por arenas amarillas de buena selección con estratificación cruzada y ondulitas superficiales. La morfología de dunas transversales que indican dirección del



viento predominante en sentido NNE. Según Gana et al. (1996), esta unidad sería parte de los sedimentos que rellenan la Bahía de Valparaíso. Como se mencionó anteriormente, esta unidad correlacionable en términos de composición y distribución con la definida por Álvarez (1964) denominada **Qp** (Cuaternario Playa).

**Depósitos eólicos subactuales (Qd).** Esta unidad representada de color blanco en la Figura 5.10, de edad Holoceno, corresponde a sedimentos no consolidados de paleodunas inactivas compuestas por arenas amarillas bien seleccionadas con estratificación cruzada, cubiertas por vegetación y desarrollo urbano. Si bien en el Mapa de Gana et al. (1996) aparecen expuestas en menor nivel en la zona norte (Las Salinas), en el mapa de Álvarez, 1964 (Figura 5.11) aparece expuesta como una gran unidad (**Qd**) en sector Reñaca – Concón (color naranja) y también se reconoce en el Mapa de Rivano et al. (1993) como la unidad PQd (sedimentos eólicos antiguos, Paleodunas), color amarillo punteado en Figura 5.12. Cuando se describa en términos locales la geología de la comuna de Viña del Mar, se hará mayor referencia a la disposición, distribución y reactivación de estas unidades.

**Depósitos Aluviales (Qa).** Mostrada de color blanco en la Figura 5.10 corresponde a sedimentos no consolidados de origen aluvial ubicados en zonas de llanuras, compuestos por gravas, arenas y limos. Estos depósitos son reconocidos en la zona de Santa Inés, en Viña del Mar, y se asocian a la unidad definida por Álvarez (1964) denominada **Qc (coluvio)**.

**Depósitos de remoción en masa (Qrm).** En los antecedentes bibliográficos se reconocen estos depósitos de movilización gravitacional (Holoceno), y cuya mayor exposición de estos materiales está ubicada en la vertiente occidental del Cerro Curauma, no aflorando en la zona de estudio.

**Depósitos coluviales Holoceno (Qc).** Sedimentos no consolidados, ubicados en las cabeceras de las quebradas, y comprenden principalmente depósitos gravitacionales correspondientes a flujos en masa, matriz-soportados, de muy mala selección granulométrica, que pueden incluir desde bloques hasta arcillas, interdigitados con lentes de arenas y gravas generados por pequeños cursos de agua, permanentes o esporádicos. Si bien no se ven explícitamente en el Mapa de Gana et al. (1996), corresponderían a la unidad de Coluvio (Qc) registrados y mapeados por Álvarez, 1964 (color anaranjado claro de Figura 5.11).

**Depósitos Fluviales actuales Holoceno (Qf).** Sedimentos no consolidados de cursos fluviales activos. Predominan facies de relleno de canal con base erosiva, constituidas por gravas clastosoportadas, compuestas por bolones redondeados a bien redondeados de baja esfericidad, en parte imbricados; lentes de arenas con estratificación plana-horizontal y cruzada y escasos limos finamente laminados. Álvarez (1964) también reconoce y describe estos depósitos (**Relleno Fluvial Qf**), y por la escala del estudio aparecen identificados en el área y descritos como relleno de valles compuestos por arenas, gravas y limos que engranan con materiales coluviales heterogéneos. Hacia el río Aconcagua, estos sedimentos tendrían mayor exposición, llegando a formar terrazas fluviales (Rivano et al., 1993) denominándolos como **Qac** (sedimentos aluviales y coluviales de relleno de valles), reconocidos en el entorno del estero Reñaca.

**Depósitos fluviales subactuales (Qfs)** del Holoceno, reconocidos y diferenciados por Gana et al. (1996) compuestos por sedimentos no consolidados de cursos fluviales abandonados, compuestos por gravas, arenas y limos, con desarrollo de cubierta vegetal y reconocidos a un mismo nivel topográfico con respecto al curso fluvial activo. Junto con los anteriores, se reconocen depósitos fluviales antiguos Holoceno (**Qfa**) compuestos por sedimentos no consolidados que conforman terrazas, compuestos por gravas, arenas y limos, ubicadas a alturas de 3-30 m con respecto al curso fluvial actual. Hospedan placeres auríferos.

Es importante destacar a nivel regional los procesos erosivos y de meteorización que afectan las rocas intrusivas jurásicas y paleozoicas. La descomposición de rocas intrusivas, específicamente los minerales de arcilla dan como producto materiales residuales de tipo maicillo con colores rojizos, son frecuentes en el área de estudio. Según Álvarez (1964) las rocas meteorizadas cubren la mayor parte del área de estudio, con espesores desde 7 a 30 metros variando en forma gradual de mayor nivel de descomposición hasta llegar a la roca fresca. Los factores de mayor influencia en estos procesos superficiales son la cobertura vegetal, grado de fracturamiento de las rocas (que permite que material orgánico y agua penetre en los afloramientos), humedad e influencia de la composición química de las aguas meteóricas. Además, es frecuente identificar procesos de erosión pluvial en distintas etapas, escorrentía, surcos y en el caso extremo de tipo cárcavas (Ver Fotografías 5.8 y 5.9). Estos procesos generan geometrías irregulares en laderas naturales y cortes artificiales, sumado a una pérdida en la resistencia de los materiales, favorece las condiciones para la generación de procesos de tipo remoción en masa.



**Fotografía 5.8. Evidencia de procesos erosivos y de meteorización (cárcavas) presentes en paleodunas**

**Fuente: Obtención propia, en subida Alessandri, Viña del Mar**

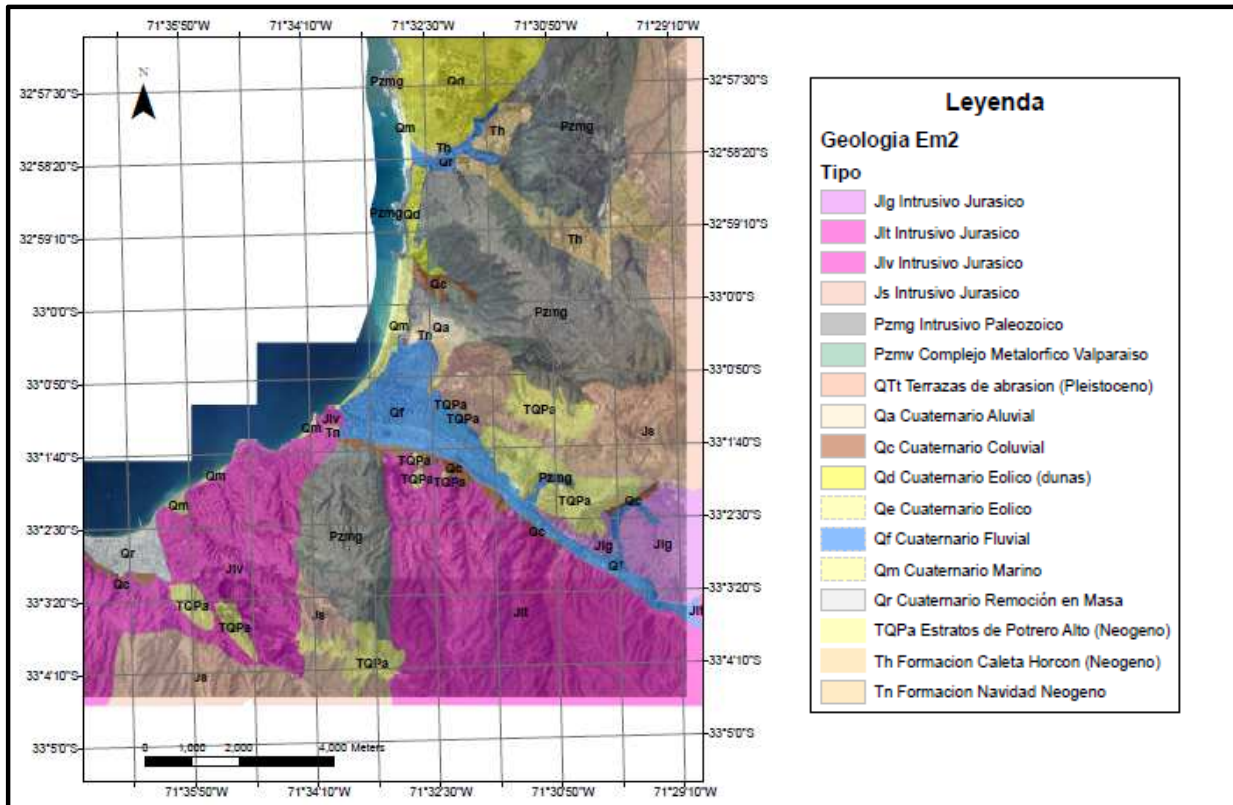


**Fotografía 5.9. Evidencias de procesos erosivos y meteorización (cárcavas) en paleodunas y rocas intrusivas**  
**Fuente: Obtención propia. Sector Las Salinas – Reñaca.**

Junto con la recopilación y revisión de estudios anteriores, se realizaron 15 jornadas de trabajo en terreno orientadas a chequear unidades, validar contactos, la distribución y características geológicas y geotécnicas generales de cada unidad.

Cabe señalar que la escala de la información base varía entre los 1:250.000 y 1:50.000, lo que genera ciertos niveles de incerteza o menor detalle en los contactos, que en algunos casos fueron ajustados con la información de terreno. Además actualmente algunos sectores presentan mayor exposición de algunas unidades producto de la construcción de cortes y remoción de vegetación, lo que han permitido ver las unidades sobreyaciendo bajo los niveles superficiales.

El resultado del presente trabajo se resume en un Mapa Geológico simplificado 1:50.000 del área Reñaca, Viña del Mar y Valparaíso y presentado en Anexo D y mostrado en la Figura 5.13.



**Figura 5.13. Mapa Geológico Simplificado Sector Valparaíso, Viña del Mar y Reñaca, escala 1:50.000**  
**Fuente:** Elaboración propia a partir de Gana et al. (1996); Álvarez (1964) y Rivano et al. (1993).

Cabe señalar los criterios utilizados para la generación del Mapa Geológico Simplificado de este trabajo:

- Se mantiene en general la nomenclatura de las unidades definidas por los mapas del Servicio Nacional de Geología y Minería (Gana et al., 1996 y Rivano et al., 1993), sugiriendo en algunos casos posibles correlaciones entre unidades descritas en ambos mapas, especialmente del punto de vista geotécnico.
- Los contactos y límites de unidades quedan mejor representados por Álvarez, 1964 (escala 1:50.000), por lo que se ajustó la información a los contactos y validaciones de terreno, especialmente en unidades terciarias y cuaternarias.
- En forma adicional, se definieron nuevos contactos a partir de la información de terreno y cartografía del área.
- En términos de unidades de roca (paleozoicas y jurásicas), la información considerada como válida es la propuesta por los mapas del Sernageomin.
- El objetivo final que tiene el Mapa Geológico Simplificado se basa en su uso en proyectos de Ingeniería, estudios geotécnicos y de geología aplicada.

A continuación se presenta con mayor detalle las unidades reconocidas en las comunas de Valparaíso y Viña del Mar, con énfasis en afloramientos en áreas urbanas.

### 5.3.3 GEOLOGÍA COMUNA DE VALPARAÍSO

En el caso de Valparaíso, la información geológica a escala comunal se basa en los trabajos de Gana et al. (1996) y Álvarez (1964), la cual fue complementada con visitas a terreno orientadas a chequear algunos aspectos de discrepancias entre las fuentes de información.

Se destaca que en términos de las unidades paleo-jurásicas, la información de Gana et al. (1996) es la más acertada en términos de contactos y edades asignadas. Mientras que Álvarez (1964) aporta mayor detalle en la definición de unidades terciarias y cuaternarias, especialmente unidades de coluvios en los cambios de pendientes entre el Plan de Valparaíso y los Cerros más algunas unidades de rocas sedimentarias poco consolidadas de origen continental (estuarial) y que son identificados por Gana et al. (1996).

La Figura 5.14 muestra un detalle del Mapa Geológico simplificado propuesto por este trabajo en la comuna de Valparaíso, donde en términos generales se puede apreciar que el área estaría casi en su totalidad formada por rocas intrusivas jurásicas, con distintos grados de meteorización, con sectores de depósitos coluviales y de remoción en masa en zonas de quebradas y cortes con fuertes pendientes.

Dentro de los puntos chequeados en terreno, se menciona el contacto entre rocas jurásicas (Jlv) y paleozoicas (Pzmg) en sector Caleta Membrillo (Las Torpederas) y el sector de subida Jorge Washington, donde Álvarez (1964) reconoce un afloramiento de Qe (estuarial) mostrado en la Fotografía 5.10.

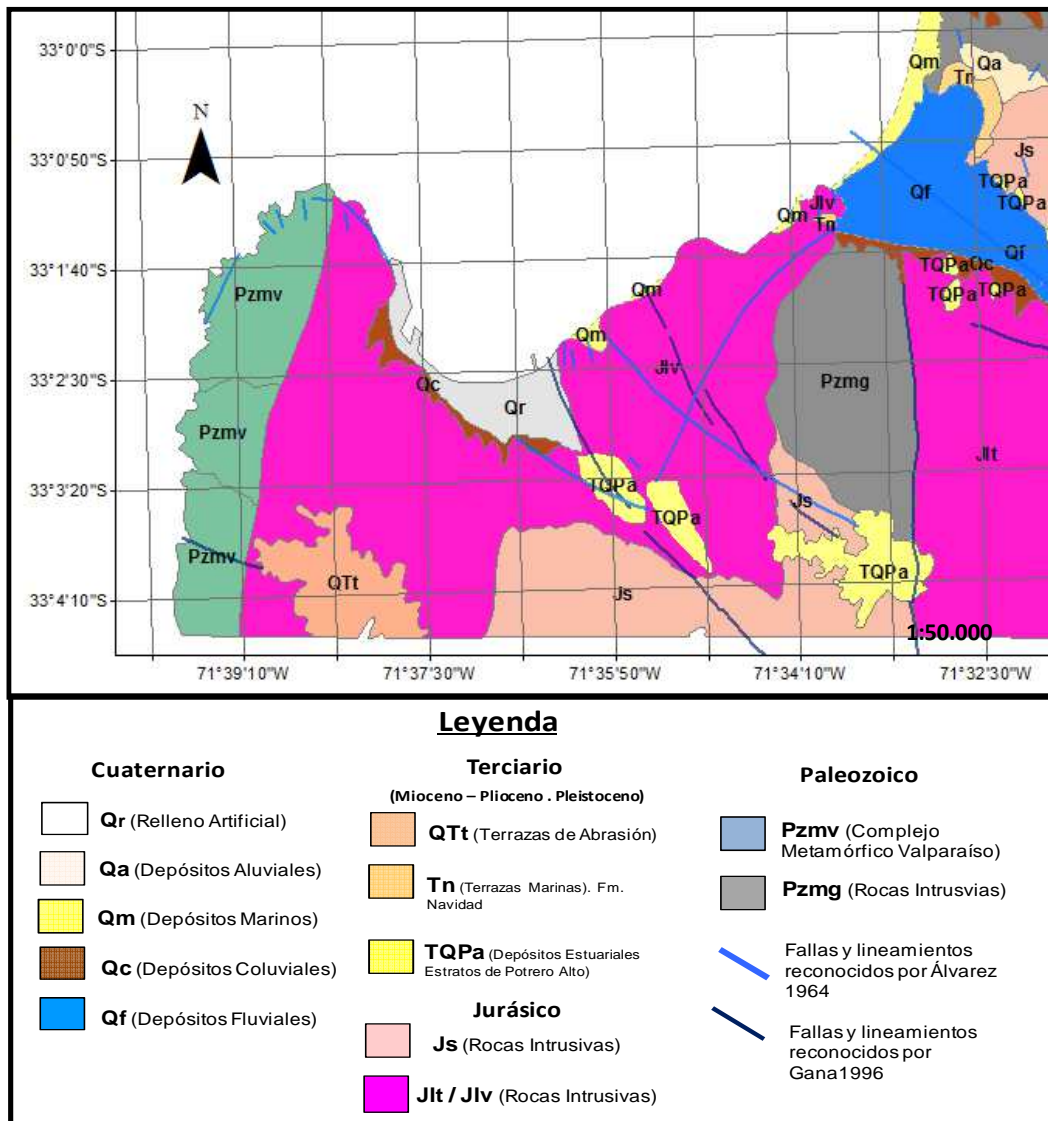


Figura 5.14. Mapa Geológico Simplificado – sector Valparaíso

Fuente: Elaboración propia a partir de Gana et al. (1996); Álvarez (1964) y Rivano et al. (1993).



**Fotografía 5.10. Vista de Depósitos Estuariales en Av. Washington**  
**Fuente: Obtención propia**

#### 5.3.4 GEOLOGÍA COMUNA DE VIÑA DEL MAR

A continuación se presentan las unidades geológicas reconocidas a escala comunal en Viña del Mar, las cuales fueron definidas a partir del análisis de la información base resumida en la Figura 5.13 (Mapa Geológico Simplificado Sector Valparaíso, Viña del Mar y Reñaca, escala 1:50.000). Este trabajo fue complementado con al menos 15 jornadas en terreno en sectores señalados a continuación y mostrados en las Figuras 5.15 y 5.16).

- Sector Valparaíso Sporting Club
- Sector 5 Oriente (antigua Maestranza)
- Sector Santa Inés y subida Alessandri (entorno Torre Coraceros)
- Afloramientos entorno supermercado Líder, subida Av. Alessandri
- Reñaca y alrededores
- Sector Las Salinas
- Sector Canal Beagle

- Jardín Botánico
- Cerro Castillo
- El Salto
- Sector Recreo



Figura 5.15. Sectores recorridos (Viña del Mar)  
Fuente: Imagen Google earth modificada

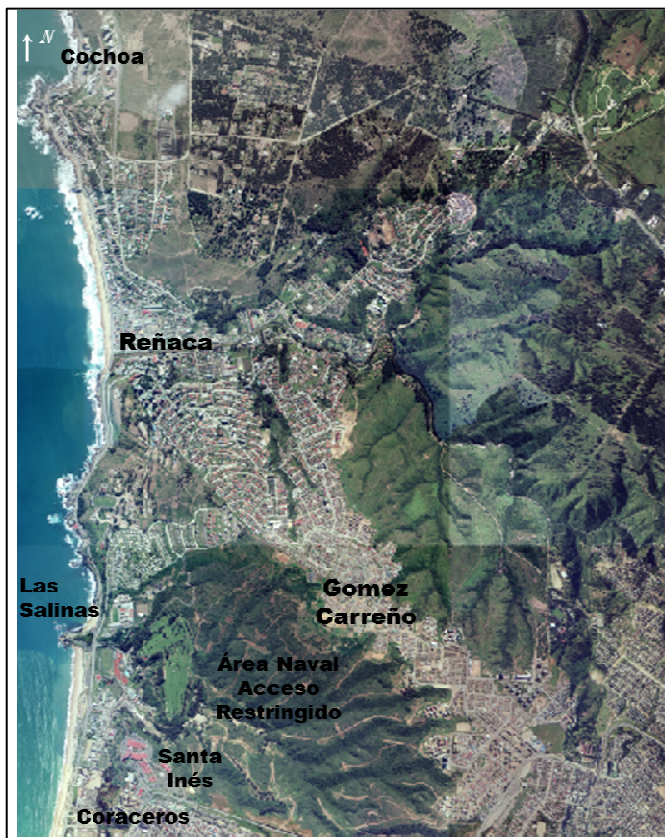


Figura 5.16. Sectores recorridos. Viña del Mar y Reñaca

Fuente: Imagen Google earth modificada



La Figura 5.17 muestra un detalle del Mapa Geológico Simplificado escala 1:50.000 (propuesto por este trabajo) en el área de Viña del Mar y Reñaca, incorporando el análisis y validación de la información base disponible, agrupada y homogenizada en función de los criterios mencionados al inicio.

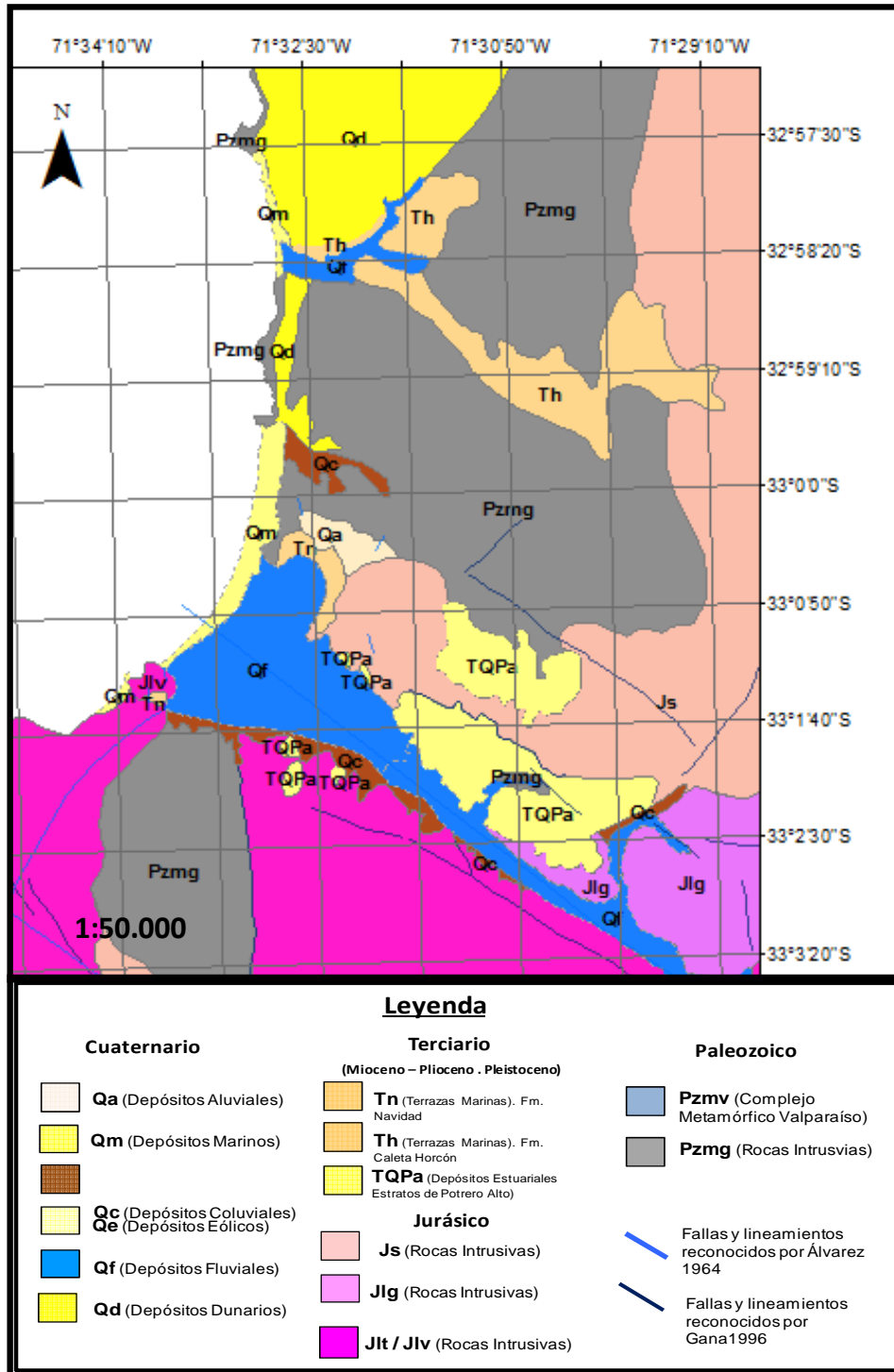


Figura 5.17. Mapa Geológico Simplificado 1:50.000 Viña del Mar - Reñaca  
Fuente: Elaboración propia a partir de Gana et al. (1996); Álvarez (1964) y Rivano et al. (1993).

Dentro de la validación de la información, de más antiguo a más nuevo se reconocieron:

- **Rocas intrusivas paleozoicas.** Las unidades de granitoides paleozoicos (Pzmg) fueron identificadas al sur de calle Álvarez (entre Agua Santa y Quinta Vergara) y al norte de la laguna Sausalito, con posible continuidad hacia el sector norte (Reñaca) con la unidad Pzc definida por Rivano et al. (1993) y mostrada de color gris en la Figura 5.16.
- **Rocas intrusivas jurásicas.** En el área urbana de Viña del Mar, esta unidad se reconoce en el sector Cerro Castillo, en el acantilado costero en (Av. España), como se muestra en la Fotografía 5.11 (Sector Recreo), en el entorno de la laguna Sausalito y el Valparaíso Sporting Club (Fotografía 5.12) y en 5 oriente, detrás de la antigua maestranza (Fotografía 5.13).



Fotografía 5.11. Rocas intrusivas sector Recreo (Av. España, Sector Escuela Industrial)  
Fuente: Obtención propia

**INTRUSIVOS JURÁSICOS  
SECTOR SPORTING CLUB**



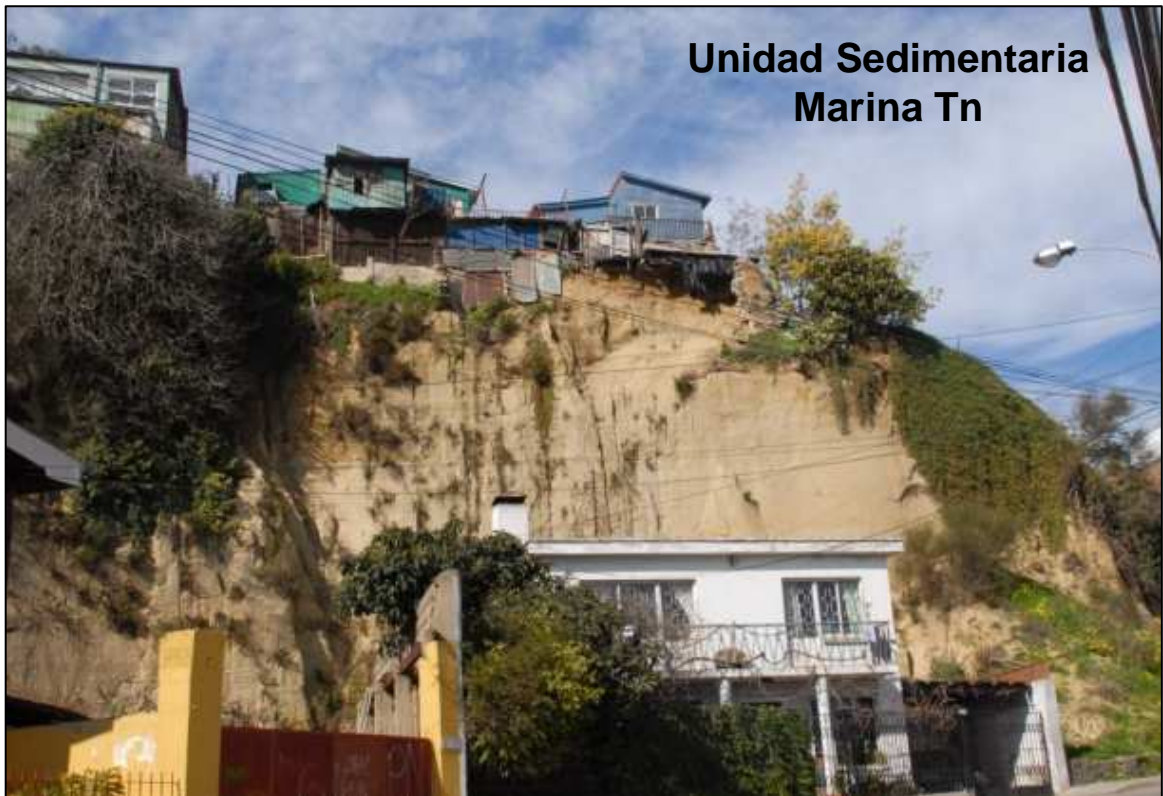
**Fotografía 5.12. Rocas intrusivas sector Valparaíso Sporting Club**  
Fuente: Obtención propia

**INTRUSIVOS  
JURASICO**



**Fotografía 5.13. Rocas Intrusivas Jurásicas sector 5 Oriente (Talud Ex Maestranza). Se destaca vetas de cuarzo-feldespató cortando afloramiento.**  
Fuente: Obtención propia

- **Terrazas marinas terciarias.** En el área urbana de Viña del Mar, se identificaron afloramientos de terrazas marinas (unidad **Tn**) en los taludes de las calles 5 oriente con 12 Norte (Fotografía 5.14) y detrás del Supermercado Líder en Av. Alessandri (Fotografía 5.15). También se reconoce esta unidad en el vértice sureste de Cerro Castillo (Fotografía 5.16). Cabe señalar que los contactos y límites de estos afloramientos en Viña del Mar quedan mejor representados por la información de Álvarez (1964), y que en la mayoría de los afloramientos los ángulos de talud superan los 70°.



Fotografía 5.14. Unidad Tn (Terrazas Marinas) sector 5 Oriente con 12 norte  
Fuente: Obtención propia



**Fotografía 5.15. Unidad Tn (Terrazas Marinas) sector Santa Inés (Av. Alessandri)  
Fuente: Obtención propia**



**Fotografía 5.16. Terrazas Marinas (Tn) sector Cerro Castillo (Av. España)  
Fuente: Obtención propia**

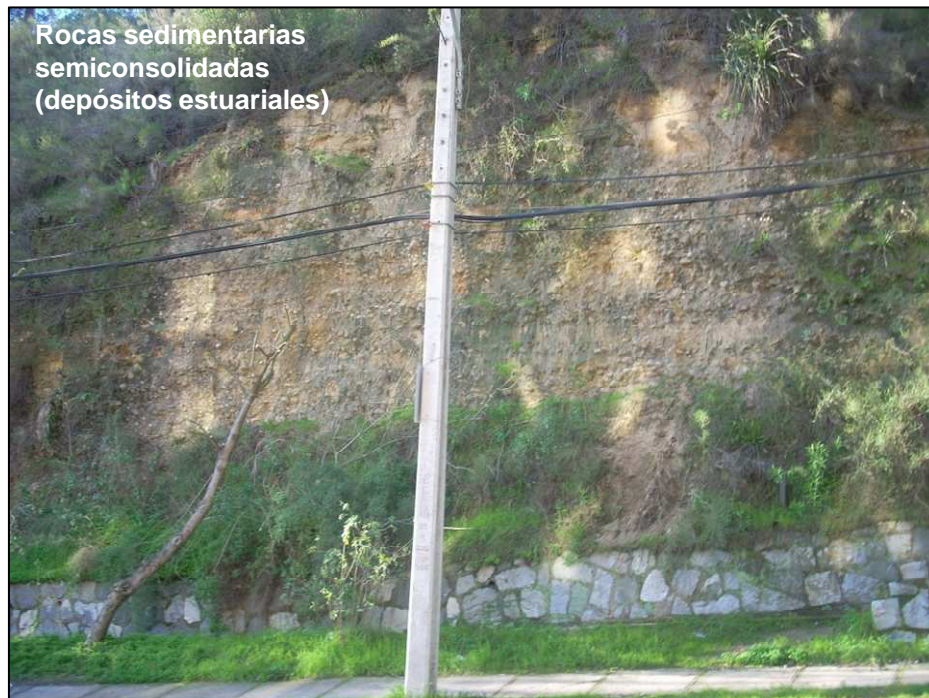
- **Rocas sedimentarias semi consolidadas de origen continental.** En el entrono urbano de la ciudad de Viña del Mar, se identificaron depósitos pertenecientes a la unidad definida por Gana et al. (1996) como Estratos de Potrero Alto (**TQPa**) consistentes en intercalaciones depósitos sedimentarios medianamente a poco consolidados de conglomerados, areniscas y limolitas con restos vegetales mal preservados, de origen predominantemente continentales aluviales. Esta unidad se reconoció en el sector del Valparaíso Sporting Club (Fotografías 5.17 y 5.18) y en sector de Canal Beagle (Fotografías 5.19 y 5.20). En el sector del Valparaíso Sporting Club, esta unidad está en contacto por discordancia angular sobre intrusivos Jurásicos.



**Fotografía 5.17. Unidad TQPa – Estratos de Potrero Alto (estuarial – continental) en discordancia sobre rocas intrusivas jurásicas sector Sporting Club**  
**Fuente: Obtención propia**



**Fotografía 5.18. Unidad TQPa – Estratos de Potrero Alto (estuarial – continental) aflorando en el sector Valparaíso Sporting Club  
Fuente: Osvaldo Carrasco (UTFSM)**



**Fotografía 5.19. Unidad TQPa- Estratos de Potrero Alto (estuarial – continental) sector Canal Beagle  
Fuente: Obtención propia**



**Fotografía 5.20. Unidad TQP<sub>a</sub> – Estratos de Potrero Alto (estuarial – continental) sector Canal Beagle  
Fuente: Obtención propia**

En el sector de Santa Inés, Gana et al. (1996) aporta la presencia de unidades Q<sub>a</sub> (aluviales). Esta información no se pudo validar en terreno (por la ausencia de afloramientos) ni con información de sondajes del área, pero morfológicamente corresponde a una zona de cambio de pendiente entre que podría estar cubierta por depósitos aluviales, por lo que a partir de topografía y fotografías aéreas ajusta el contorno para dichos depósitos.

Dentro de las validaciones realizadas en terreno, se identificaron los depósitos de arenas de dunas antiguas (dunas cubiertas por vegetación y sin movilidad de las arenas), llamadas Paleodunas según Rivano et al. (1993) o Depósitos Eólicos Sub actuales según Gana et al (1996). Estos depósitos se observan en sectores costeros de Viña del Mar, cubriendo rocas paleozoicas en el tramo entre Viña del Mar y Reñaca, y en el margen norte del estero Reñaca (Fotografía 5.21). En el caso de estas últimas, la actividad constructiva ha generado la remoción de la cobertura vegetal que mantenía estabilizadas a las dunas, generando su reactivación y migración de arenas y cambios en las tasas de erosión (Fotografía 5.22).





Fotografía 5.21. Paleodunas sector Reñaca  
Fuente: Obtención propia. Fotografía tomada en taludes de Universidad del Mar



Fotografía 5.22. Dunas y Paleodunas sector Reñaca con muestras evidentes de  
intervención Inmobiliaria  
Fuente: Obtención propia

### 5.3.5 GEOLOGÍA DEL CUATERNARIO DEL PLAN DE LA CIUDAD DE VIÑA DEL MAR

A continuación se presenta con mayor detalle la geología del cuaternario del Plan de Viña del Mar, dado que esta comuna ha sido escogida para aplicar y presentar el caso de estudio. Gana et al. (1996) señala como relleno del Plan de la comuna de Viña del Mar (o Población Vergara) la unidad denominada **Qm** (sedimentos marinos – Figura 5.10), mientras que Álvarez (1964) la denomina **Qp** (arena y gravas de playa – Figura 5.11). Sin embargo, para la escala y objetivos que tiene el presente estudio, esta información resulta insuficiente. Para entender el tipo y distribución de los depósitos en el Plan de Viña del Mar, se requiere entender el ambiente en el cual se depositaron los sedimentos y resultará fundamental para entender algunos parámetros del estudio.

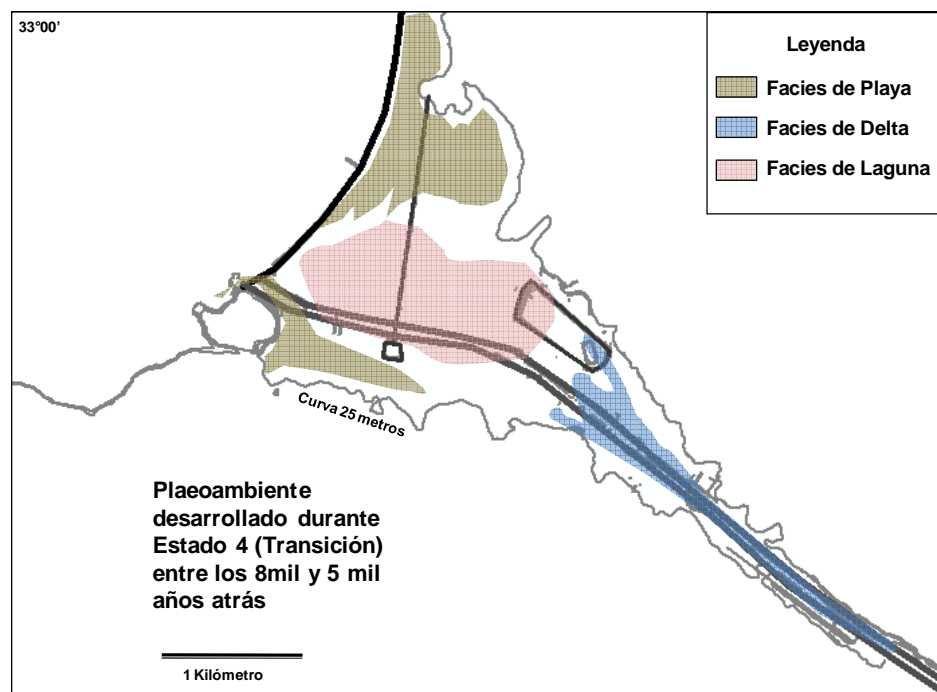
#### 5.3.5.1 ANTECEDENTES DE EVOLUCIÓN PALEOGEOGRÁFICA DEL PLAN DE VIÑA

Thorson (1999) realiza una reconstrucción paleogeográfica de la evolución de las distintas facies de depositación sedimentaria en los últimos 18 mil años (Pleistoceno superior y Holoceno) en el Plan de Viña del Mar.

A partir de antecedentes climáticos, eustáticos, morfológicos y geológicos, Thorson (1999) reconoce al menos 5 estados de evolución paleogeográfica desde la última desglaciación hace 18.000 años hasta la actualidad. Los cambios estarían asociados principalmente a periodos glacial / post glacial, cambios en las tasas de erosión sedimentación tanto del estero Marga-Marga como del mar y alzamientos tectónicos asociados a la sismicidad. A continuación se resumen los 5 estados identificados por Thorson (1999).

- En el Estado 1, más de 18.000 años atrás, Thorson (1999) interpreta que el nivel del mar habría estado bajo por el dominio de un período glacial. Este retroceso del mar respecto al continente, suele generar grandes erosiones en la plataforma continental (como cañones submarinos) dado se habría visto expuesta. Sin embargo, frente a Viña del Mar, no se observa un cañón submarino (a diferencia del cañón submarino frente a la ciudad de San Antonio), por lo que Thorson (1999) plantea que el estero Marga-Marga habría sido un estrecho canal con profundidades de hasta 80 m en el Plan de Viña por el oeste, lo que habría generado erosión y corte en el basamento rocoso.
- En un segundo estado (Estado 2), entre 18 y 13 mil años atrás, se habría generado un ensanche del valle, y el mar habría empezado a subir gradualmente, por lo que las arenas del mar habrían comenzado a dominar por sobre depósitos aluviales, especialmente en el fondo y en las laderas del estero.
- En el Estado 3, entre los 13 mil y 7 mil años atrás, se habría dado inicio a la desglaciación, por lo que el mar habría ascendido con mayor rapidez y habría inundado las zonas de estuarios costeros. En esta etapa, la transgresión marina habría inundado el Plan de Viña (hasta aproximadamente el sector del Sporting Club). La parte ancha del estero generada en las etapas anteriores se habría visto cubierta por arenas de depósitos tipo deltas y arenas de playa, lo que alza en nivel del fondo del mar. Según Thorson (1999), esto queda en evidencia por la existencia de estratos compuestos por arcillas plásticas y sedimentos marinos.
- En el Estado 4 (entre 8 y 5 mil años atrás) se genera una desaceleración de la transgresión marina y un alzamiento del fondo del mar por acumulación de sedimentos. Esto habría provocado la formación de una barra de sedimentos a lo largo de la línea de

la costa, que habría impedido la evacuación de las aguas del estero Marga-Marga en el mar. Como consecuencia de esto, se habría generado la acumulación de los sedimentos provenientes del NW del estero, intercalados con entradas del mar asociados a periodos de tormenta y ruptura de esta barra, desarrollando un ambiente marino al NW, uno deltaico al SE, incluyendo depósitos lagunares (ver Figura 5.18). Más adelante se presentan antecedentes adicionales respecto a la existencia de estos depósitos lagunares en el Plan de Viña del Mar.



**Figura 5.18. Paleo ambientes desarrollado entre 8 mil y 5 mil años atrás en el Plan de Viña del Mar**

**Fuente: Modificado de Thorson (1999)**

- El Estado 5 o estado moderno (entre 4 mil años atrás y la fecha) el Plan de Viña habría emergido por sobre el mar por causas de alzamiento tectónico y sedimentación, sumado a un retroceso paulatino en el nivel del mar. Esta condición se habría visto favorecida por la presencia del macizo de Cerro Castillo, que actuaría como un bloqueo natural de las arenas provenientes del sur, favorecido el aumento en la tasa de depositación de sedimentos sobre el Plan.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, el Plan de Viña del Mar incluiría en sus depósitos facies de playa, facies aluviales en el entorno del estero, facies de tipo llanura de inundación y facies mixtas, difiriendo de lo definido por Gana et al. (1996) y Álvarez (1964).

En el presente estudio, se desarrolla un Modelo Geológico de los primeros 30 metros bajo la actual superficie del Plan de Viña del Mar, que permitirá validar el modelo conceptual propuesto por Thorson (1999) y definir cómo habría sido la desembocadura del estero Marga-Marga por debajo del actual Plan de la ciudad.

### 5.3.5.2 PROFUNDIDAD DEL BASAMENTO ROCOSO

Un antecedente importante para el presente trabajo, es la morfología del basamento rocoso bajo el Plan de la ciudad de Viña del Mar proyectada por Verdugo (1996), quien estima su profundidad y geometría mediante un estudio geofísico (gravimétrico). Las curvas obtenidas por Verdugo (1996) se muestran en la Figura 5.19, e indican que el basamento exhibiría una geometría con dos micro cuencas bien diferenciadas de orientación dominante es NW (siguiendo una orientación similar a la proyección del estero bajo el Plan), alcanzando profundidades máximas de 175 metros bajo superficie.

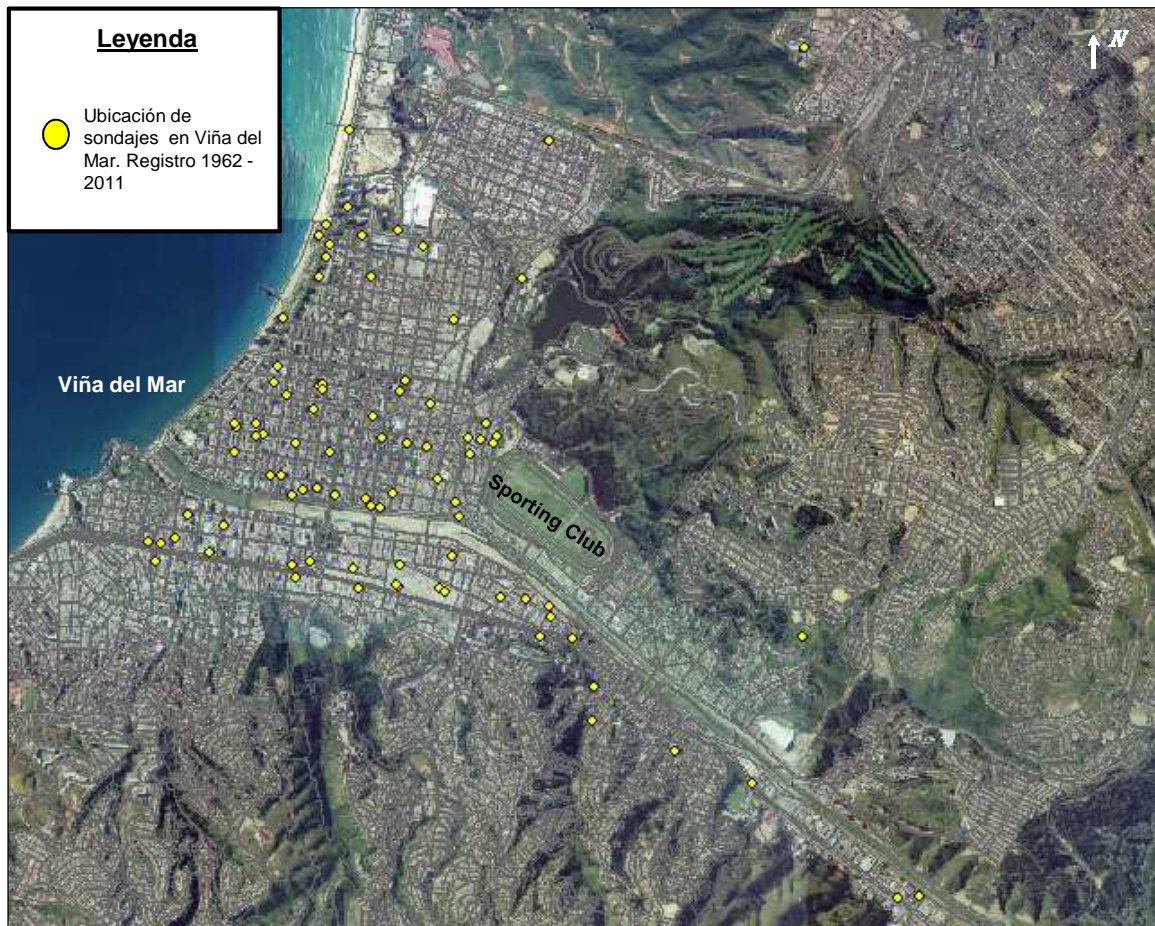


**Figura 5.19. Geometría del basamento rocoso bajo el Plan de Viña del Mar (Verdugo, 1996)**  
Fuente: Elaboración propia a partir de curvas del basamento (Verdugo, 1996) sobre imagen Google Earth

### 5.3.5.3 GEOLOGÍA DE LOS PRIMEROS 30 METROS BAJO SUPERFICIE EN EL PLAN DE VIÑA DEL MAR

A partir de la base de datos de sondajes de obras bajo la ciudad de Viña del Mar (provista por el LEMCO de la Universidad Técnica Federico Santa María en el trabajo de Carrasco y Nuñez, 2012), y mostrados en la Figura 5.20, se construyó un modelo geológico de los primeros 30 metros bajo superficie.

La información de cada sondaje fue clasificada a partir del tipo de material descrito y su origen geológico, utilizando las categorías descritas en Tabla 5.1. Posteriormente, cada sondaje y su respectiva descripción geológica por tramo fueron ubicados en forma espacial y en profundidad (mediante el uso del software MineSight).



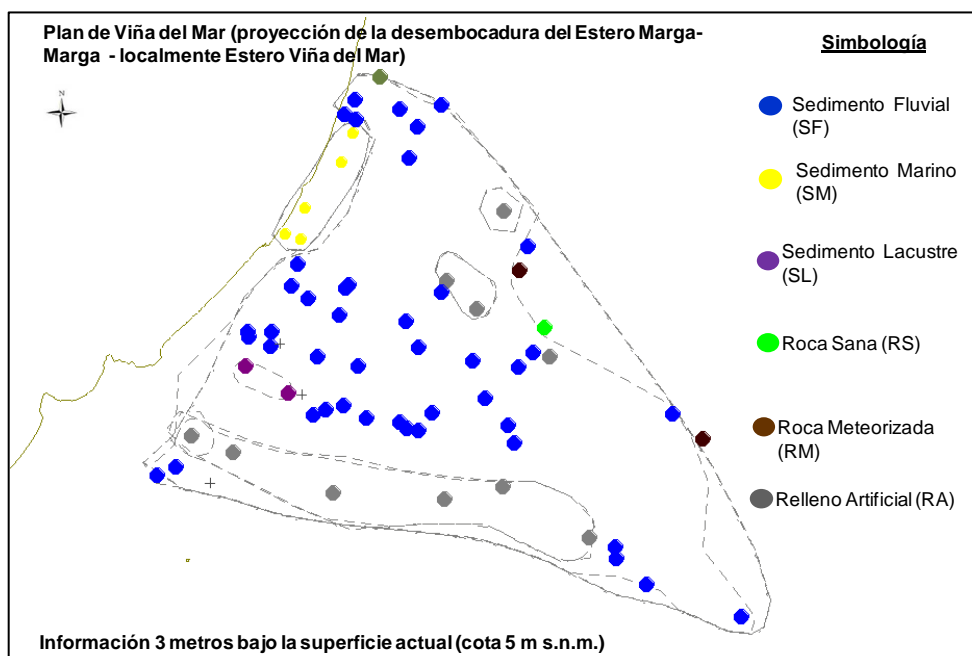
**Figura 5.20. Ubicación de sondajes – Viña del Mar**

**Fuente: Elaboración propia a partir de información provista por LEMCO UTFSM**

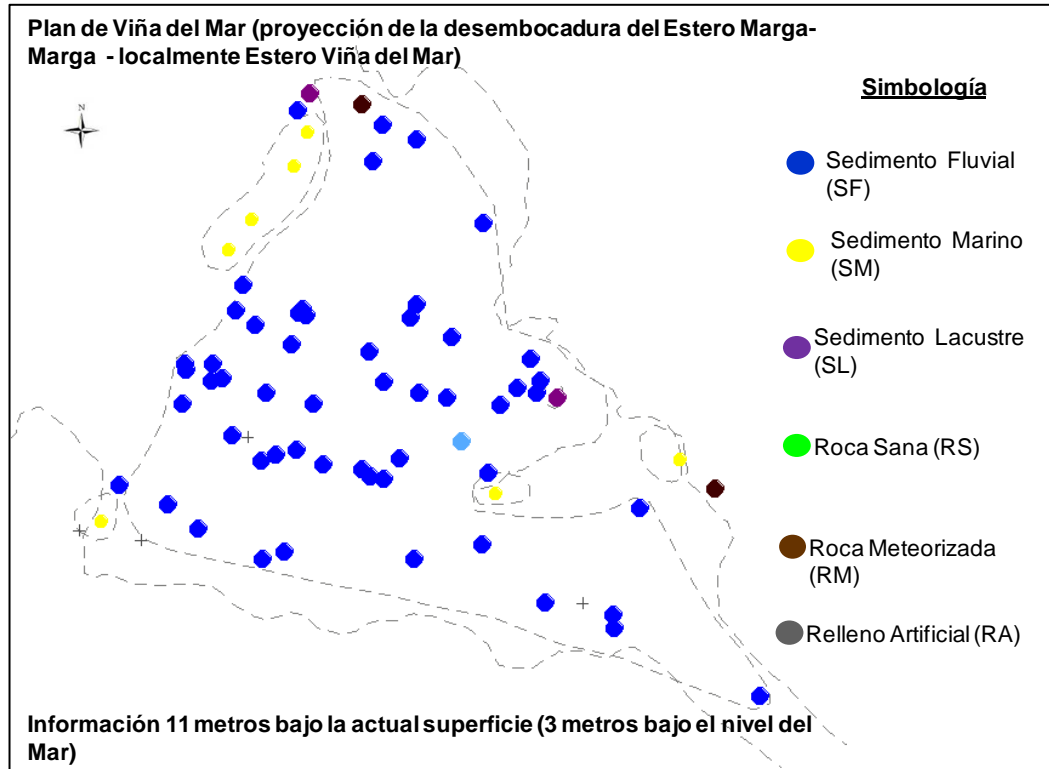
**Tabla 5.1.**  
**Unidades utilizadas para la clasificación de estratos a partir de descripción de Sondajes en Viña del Mar**

UNIDAD	SIMBOLOGÍA
Relleno Artificial	RA
Sedimento Fluvial	SF
Sedimento Marino	SM
Sedimento Estuarial	SE
Sedimento Lacustre	SL
Roca Sana	RS
Roca Meteorizada	RM
No determinado	X

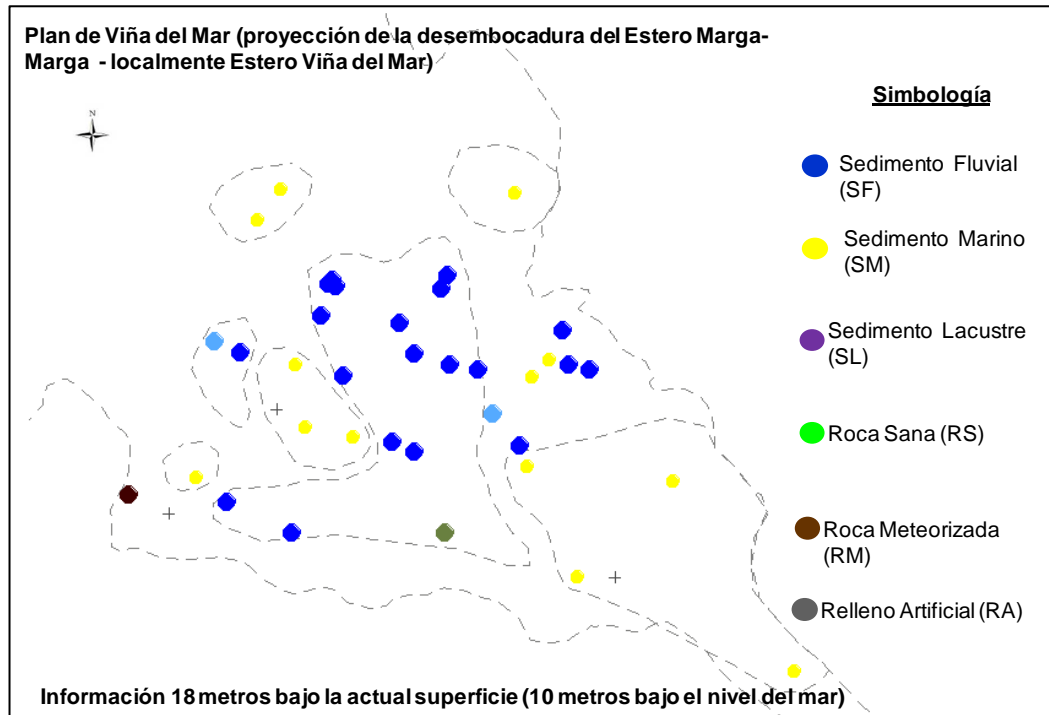
La visualización de la información de sondajes con el software MineSight permitió su manejo en tres dimensiones, especialmente en cortes horizontales cada un metro. En las Figuras 5.21, 5.22, 5.23 y 5.24 se ven algunos resultados representativos que muestran la distribución espacial de los distintos tipos de depósitos en el Plan de Viña. Cabe señalar que los sondajes más profundos alcanzan 32 metros bajo la superficie, por lo que la interpretación sólo se pudo realizar hasta esa cota.



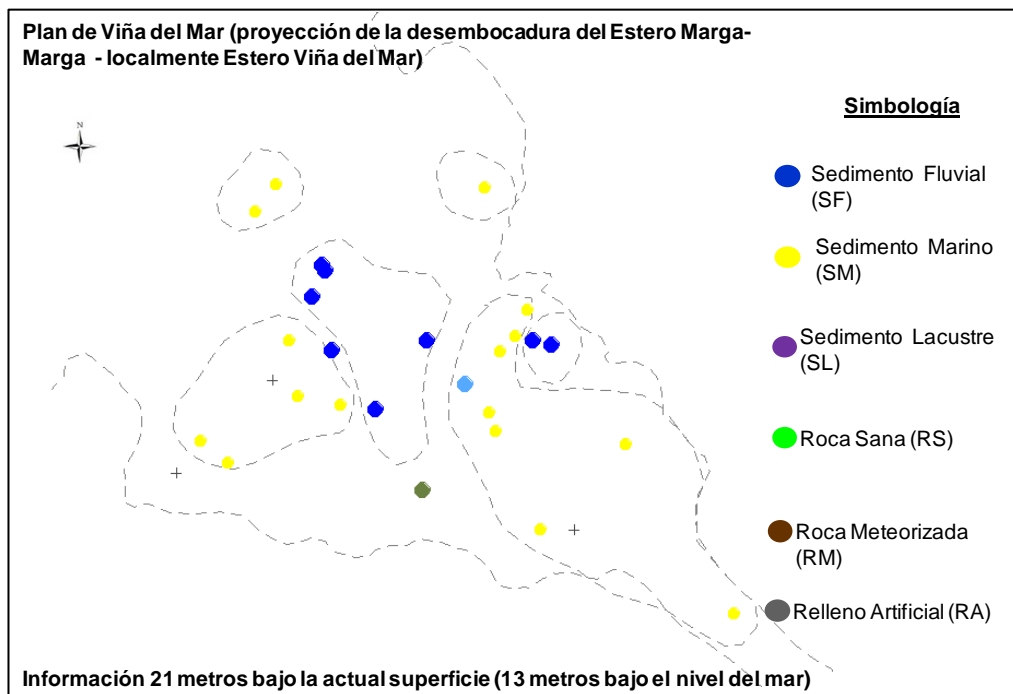
**Figura 5.21. Proyección de unidades geológicas 3 metros bajo la superficie actual**  
**Fuente: Elaboración propia con apoyo del software de diseño minero MineSight**



**Figura 5.22. Proyección de unidades geológicas 11 metros bajo la actual superficie**  
Fuente: Elaboración propia con apoyo del software de diseño minero MineSigth



**Figura 5.23. Proyección de unidades geológicas 18 metros bajo la actual superficie**  
Fuente: Elaboración propia con apoyo del software de diseño minero MineSigth



**Figura 5.24. Proyección de unidades geológicas 21 metros bajo la actual superficie**  
Fuente: Elaboración propia con apoyo del software de diseño minero MineSigh

Los resultados obtenidos permiten sugerir que efectivamente el estero generó una desembocadura tipo delta bajo el Plan de Viña, reconociéndose principalmente sedimentos fluviales en toda la superficie, alternados con depósitos marinos y algunos lacustres, y no como un único brazo del estero por debajo de la ciudad.

Otro aspecto importante, es que si bien se reconocen algunos horizontes con sedimentos lacustres (limos orgánicos y restos vegetales), que podrían ser interpretados como depósitos lagunares producto del entrapamiento de agua dulce por sedimentos marinos (barras de sedimentos), no son relevantes en área ni en espesor (menos de 2 metros), y más bien responden a situaciones puntuales. Esta interpretación difiere de la planteada por Thorson (1999) que señala la existencia de una paleolaguna bajo el Plan de Viña del Mar, específicamente en el sector entre las calles: Libertad, 6 Norte, Quillota y 2 Norte.

Las Figuras 5.25 y 5.26 muestran los resultados a modo de interpretación a 13 y 21 metros bajo superficie respectivamente, superpuestos con la geometría de basamento estimada por Verdugo (1996). Aparentemente los depósitos siguen un patrón geométrico en dirección de las cuencas NW, a pesar que las profundidades no son las mismas.



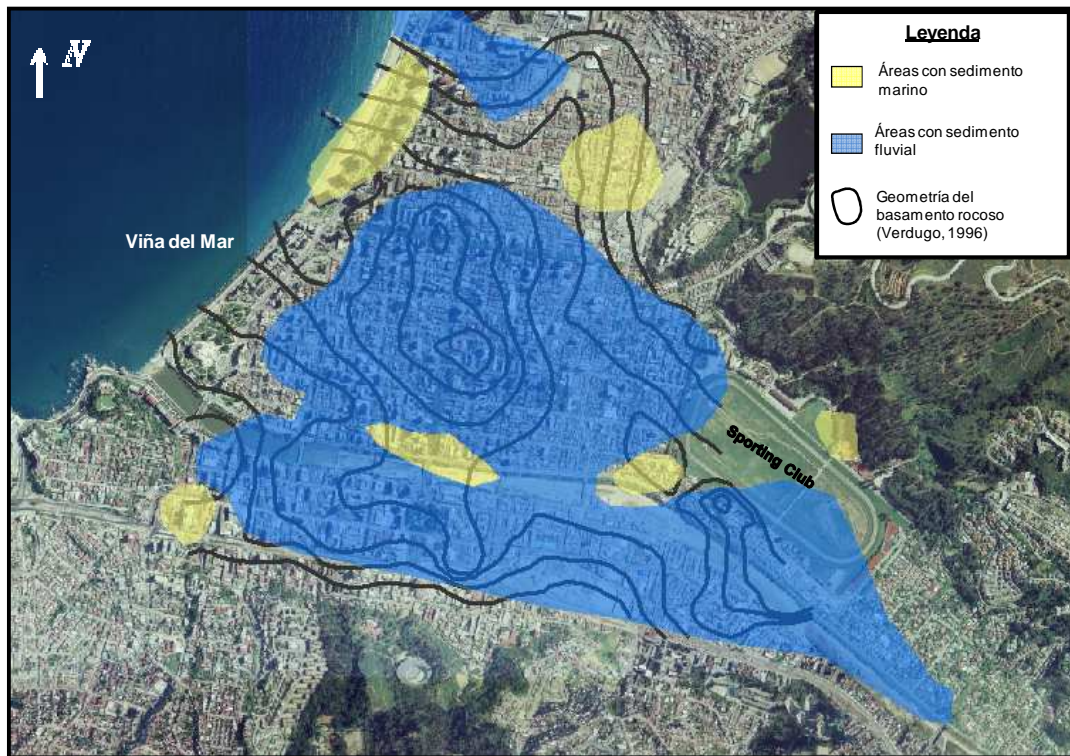


Figura 5.25. Interpretación de unidades de suelo 13 metros bajo la actual superficie  
Fuente: Elaboración propia

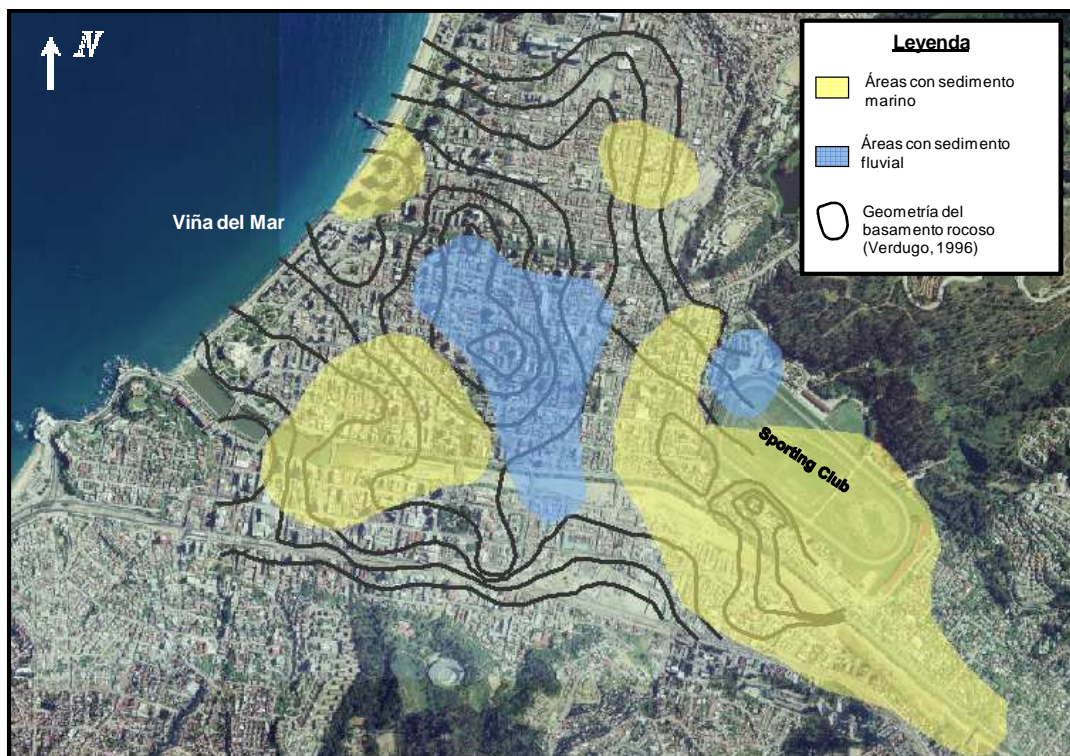


Figura 5.26. Interpretación de unidades de suelo 21 metros bajo la actual superficie  
Fuente: Elaboración propia

### 5.3.6 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

El presente capítulo se basa en los aspectos regionales aportados por los trabajos de:

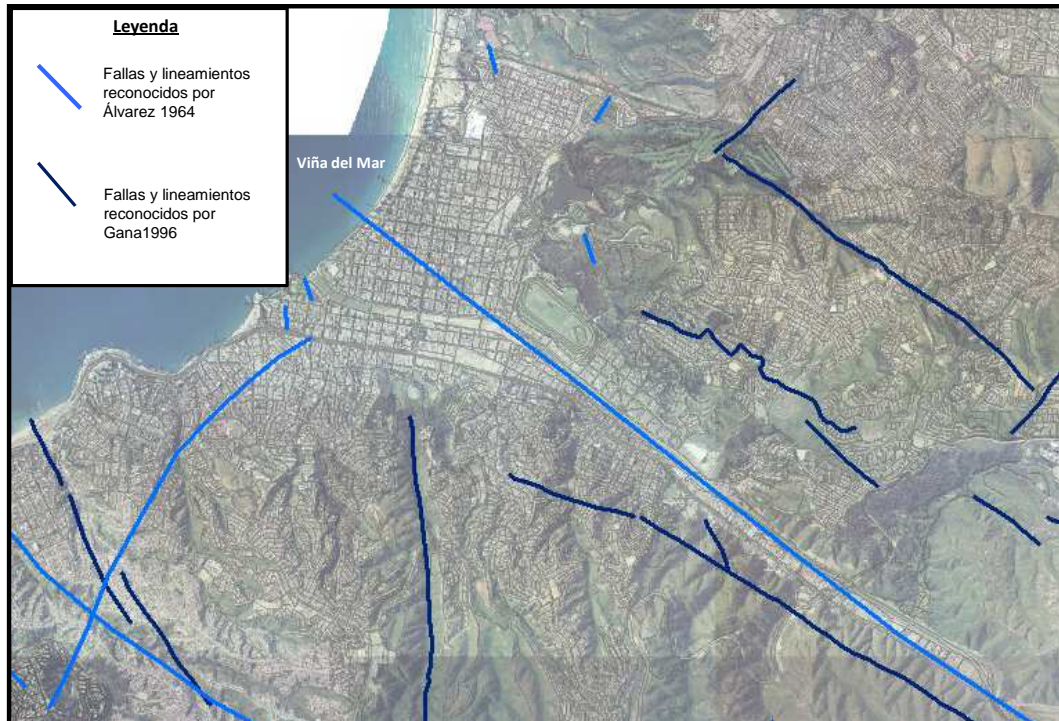
- Álvarez, 1964. Geología del área Valparaíso – Viña del Mar. Instituto de Investigaciones Geológicas (IIG) Chile, Boletín N.º 16.
- Gana et al. (1996), Mapa Geológico del Área de Valparaíso – Curacaví 1:100.000. SERNAGEOMIN
- Hauser, 2003. Diagnóstico geológico geotécnico de seis sectores de laderas y taludes inestables, en casco urbano
- Léppez et al. 2005. Peligro de remociones en masa e inundaciones de las ciudades de Valparaíso, Viña del Mar y Concón. Región de Valparaíso. SERNAGEOMIN. Informe Registrado. IR-05-29, 24p, 1 anexo, 2 mapas en 6 hojas escala 1:10.000.
- Thorson, 1999. La falla “Marga-Marga” Viña del Mar – Chile. Departamento de Obras Civiles UTFSM.
- Sabaj, 2008. Identificación y caracterización de estructuras potencialmente activas en la cordillera de la costa, entre los 33° y 33°45’ Sur. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología.

A escala regional, la zona de estudio se encuentra afectada por fallas y lineamientos principalmente de orientación NW (Álvarez, 1964; Gana et al., 1996; Sabaj, 2008) y algunos con orientación NE (Gana et al., 2000 en Sabaj, 2008). Los lineamientos NW además de controlar la mayoría de las grandes quebradas en la región (Álvarez, 1964), han sido interpretados como fallas que han sufrido dislocaciones tectónicas en el cuaternario (Álvarez, 1964; Castro y Brignardello, 1997) dada la dificultad que se presenta correlacionar los niveles aterrizados a un lado y al otro de cada quebrada.

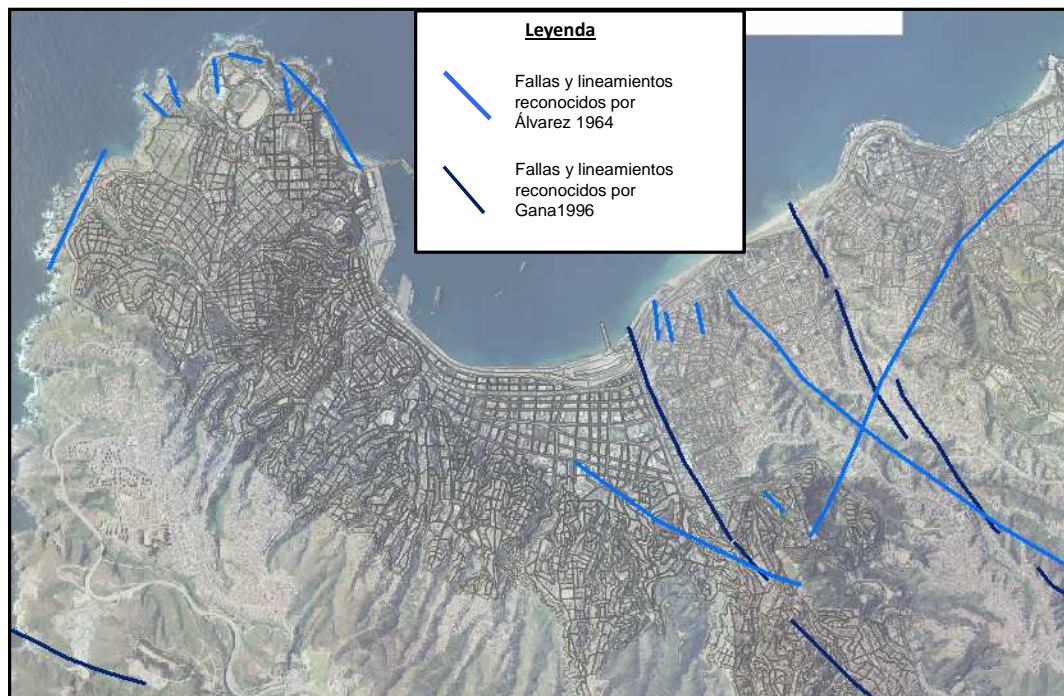
El principal rasgo estructural de la zona corresponde al sistema de fallas del Marga-Marga (Figueroa et al., 1997) que sigue el trazado general del valle en dirección sureste-noroeste, con rumbo N 40° W y N 60° W y una longitud de 50 Km. Para el presente estudio, el interés en esta falla radica en las implicancias que representa en el peligro sísmico (en la ciudad de Viña del Mar), cuyos antecedentes y resultados se presentan en extenso en el capítulo 7.

En el caso de la comuna de Valparaíso, la existencia de lineamientos en las quebradas da cuenta de posibles estructuras mayores. Se señalan como de importancia el límite este del plan (paralelo a Avenida Argentina), junto con la quebrada asociada a Portales.

Las Figuras 5.27 y 5.28 muestran los lineamientos y fallas reconocidas por autores en estudios anteriores.



**Figura 5.27. Lineamientos y fallas reconocidas por Gana et al. (1996) y Álvarez (1964) en Viña del Mar**  
**Fuente: Elaboración propia**



**Figura 5.28. Lineamientos y fallas reconocidas por Gana et al. (1996) y Álvarez (1964) en Valparaíso**  
**Fuente: Elaboración propia**

En términos de discontinuidades menores en el área de estudio, es importante destacar la presencia de diaclasamiento tanto en rocas intrusivas jurásicas como paleozoicas, así como lineamientos asociados a foliación en rocas metamórficas.

En términos de discontinuidades menores, los macizos rocosos que afloran en el área de estudio se encuentran fuertemente diaclasados y fracturados en bloques. Según López (2005) predominan las orientaciones N45°W, N45°E y NS (es decir, siguiendo los patrones de los lineamientos mayores).

La presencia de este tipo de discontinuidades por un lado favorece la meteorización de los macizos rocosos, al permitir la incorporación de aguas meteóricas y disgregar en forma mecánicas las rocas, y por otro lado, genera bloques preformados susceptibles a caer por gravedad o por sismicidad. Las Fotografías 5.23 y 5.24 muestran la condición descrita en distintos puntos de las comunas.



**Fotografía 5.23. Foliación en rocas del Complejo Metamórfico Valparaíso**  
**Fuente: Obtención propia. Fotografía tomada en sector Torpederas – Valparaíso.**



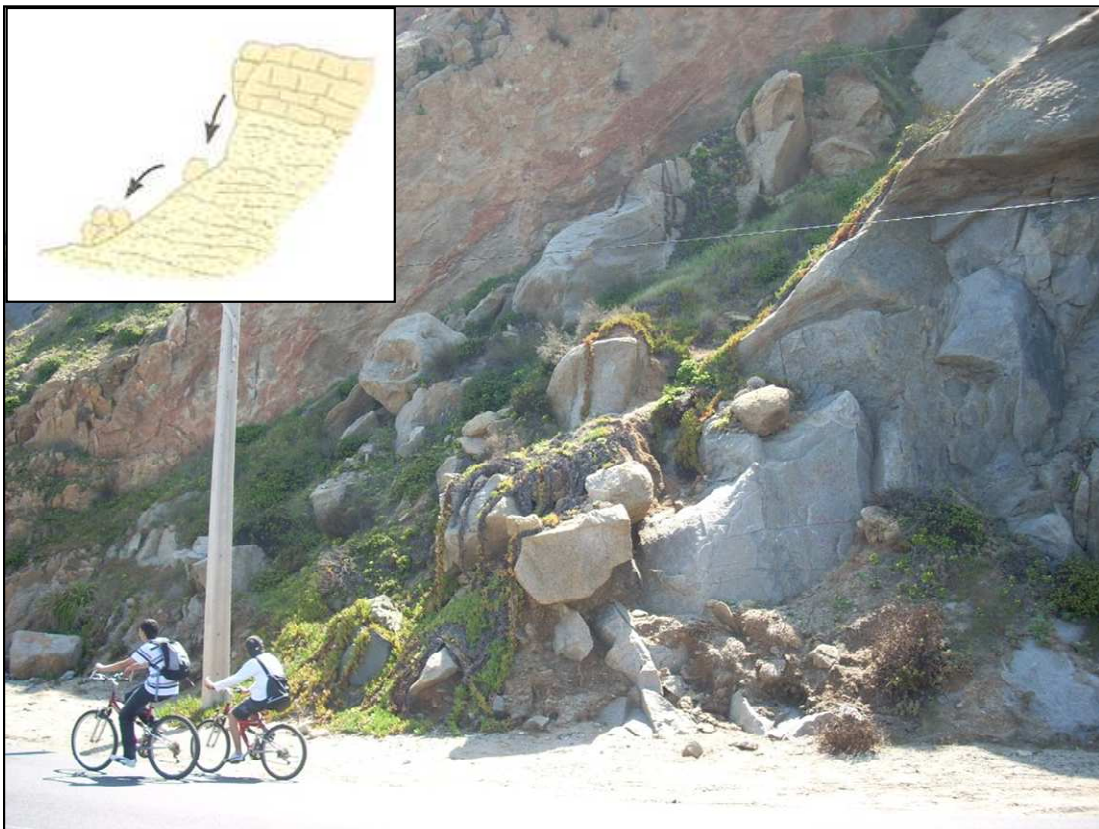
**Fotografía 5.24. Diaclasamiento del macizo rocoso intrusivo jurásico**  
**Fuente: Obtención propia. Fotografía sector Av. España (Cerro Barón, Valparaíso)**

## CAPÍTULO 6. SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN MASA EN ÁREAS URBANAS EN VIÑA DEL MAR

### 6.1 TIPOS DE PROCESOS MÁS COMUNES EN LA ZONA DE ESTUDIO

La ciudad de Viña del Mar, y en particular su área urbana presenta sectores favorables a la ocurrencia de procesos de remoción en masa debido principalmente a las condiciones geomorfológicas y geológicas de la comuna, como por ejemplo altas pendientes en las laderas de las terrazas marinas y acantilado costero, o presencia de bloques preformados (especialmente en rocas intrusivas) limitados por sistemas de diaclasas.

De acuerdo a los antecedentes bibliográficos, estudios anteriores y observaciones realizadas en terreno, históricamente en la zona de estudio se han generado eventos de remociones en masa a distintas escalas, especialmente de tipo caídas de rocas, deslizamientos de roca, deslizamientos de suelos y arenas de dunas, socavamiento de plataformas y eventos de tipo flujo. Las Figuras 6.1 a 6.4 muestran esquemáticamente algunos de los eventos identificados en la comuna.



**Figura 6.1. Caídas de rocas sector acantilado rocoso costero entre Reñaca y Concón.  
Fuente: Obtención y elaboración propia**

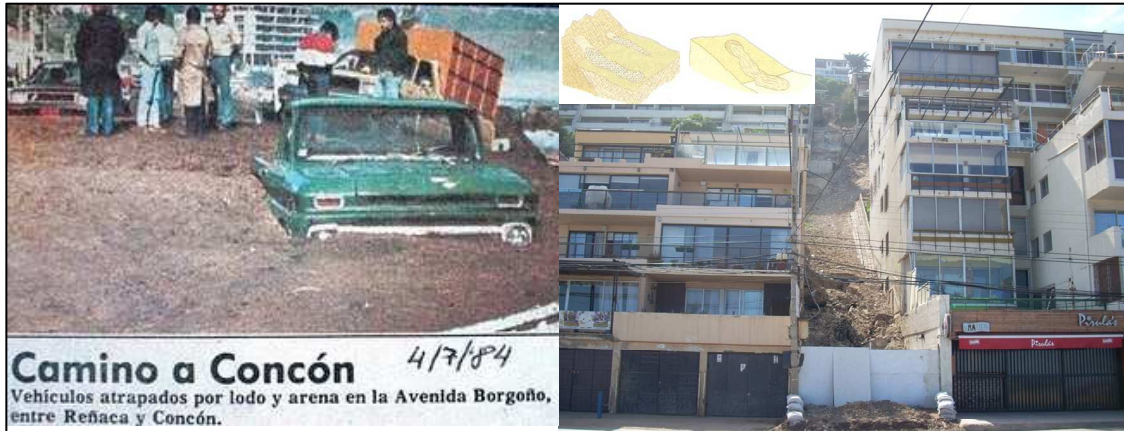


Figura 6.2. Registros de eventos de tipo flujo de barro y detritos en sector Reñaca. Izquierda: aluvión de Reñaca 1984. Derecha. Flujo de barro y detritos 2010. Fuente: Izquierda <http://4.bp.blogspot.com>. Derecha. Obtención propia



Figura 6.3. Registros de eventos de tipo deslizamiento de cuñas en camino costero sector Reñaca. – Las Salinas. Fuente: Obtención y elaboración propia

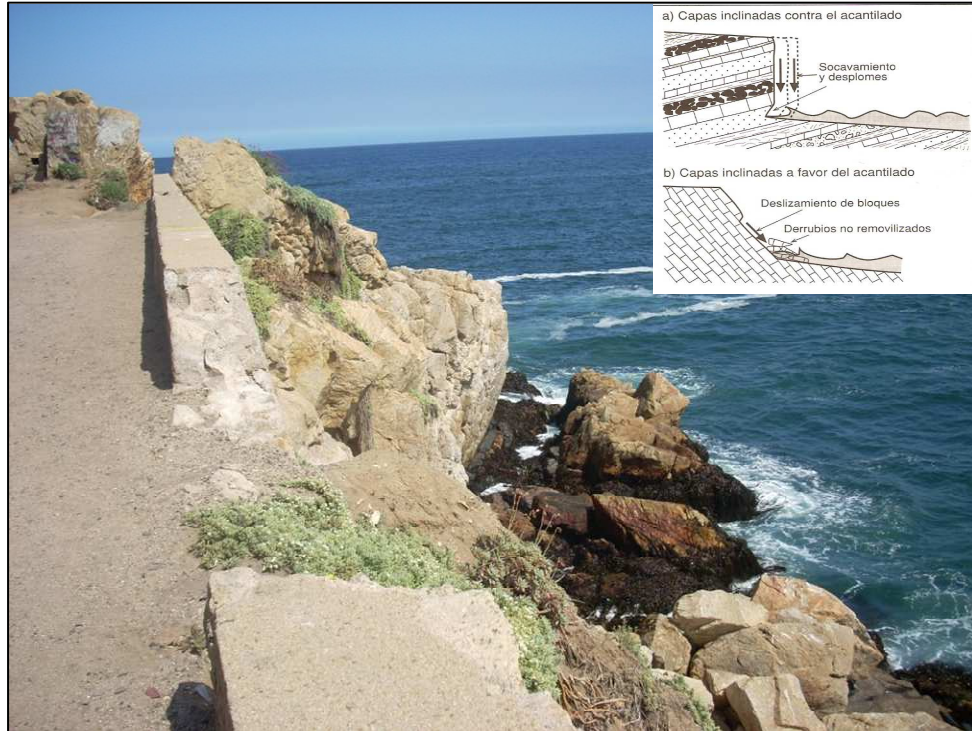


**Figura 6.4. Registros de eventos de tipo deslizamiento rotacional sector Reñaca Cochoa en arenas de dunas**  
**Fuente: Obtención y elaboración propia**

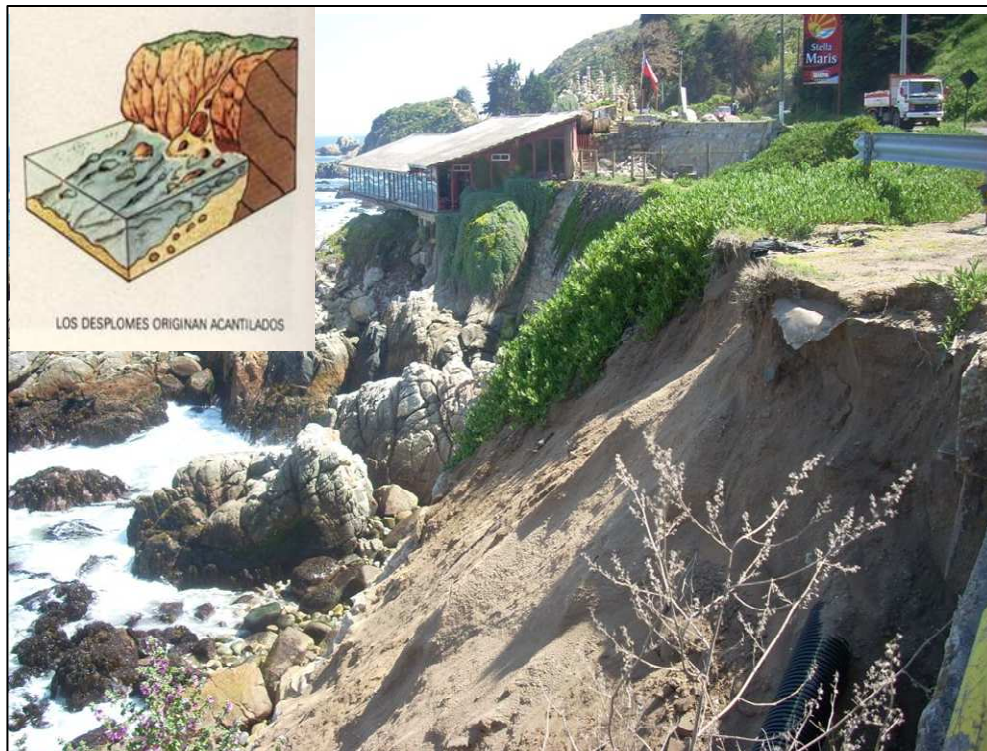
Otro tipo de proceso evidenciados en la zona de estudio están relacionados con los procesos de erosión costera de acantilados y socavamiento de plataformas (ver Figuras 6.5 y 6.6) que se muestran a modo de ejemplo ya que no serán abordados por el presente estudio.

También se reconocieron eventos de tipo inundaciones, ya sea por invasión del terreno por un volumen de agua o por el afloramiento de aguas subterráneas, las cuales son abordadas por López et al. (2005) donde se identifican las zonas más sensibles a sufrir inundaciones, sin embargo tampoco forman parte de los objetivos del presente estudio.





**Figura 6.5. Registros de eventos de tipo desprendimientos en acantilados costeros y la influencia del control estructural en la morfología final**  
**Fuente: Obtención y elaboración propia**



**Figura 6.6. Registros de eventos de tipo caídas de roca y material asociados a erosión costera (camino Reñaca – Concón)**  
**Fuente: Obtención y elaboración propia**

## 6.2 CATASTRO DE REMOCIONES EN MASA

Con el evento sísmico del 27 Febrero de 2010 se gatillaron algunos procesos de tipo caídas de rocas (intrusivas y unidades de areniscas marinas), deslizamientos de suelos y deslizamientos rotacionales en sectores de dunas. Para definir los tipos de remociones en masa más comunes en la comuna, posterior a este evento se realiza un levantamiento preliminar de fenómenos a partir de observaciones en terreno.

En una etapa siguiente, se realiza una recopilación de antecedentes y estudios de remociones en masa en el área de estudio. Erikson et al. (2004) entrega un catastro de remociones en masa entre el 8 de agosto del año 1944 y el 16 de noviembre del año 2003. Este catastro fue realizado a partir de información de prensa (El Mercurio de Valparaíso y La Estrella de Valparaíso). López et al. (2005) presenta un catastro a partir de información de prensa de inundaciones entre los años 1864 a 2002 (235 registros), remociones en masa entre los años 1864 a 2002 remoción en masa (334 registros) y socavamiento entre los años 1851 y 2002 (60 registros).

A partir de lo anterior, se pudo extraer un registro histórico de remociones en masa en las ciudades de Valparaíso, Viña del Mar y Concón actualizado al año 2004, por lo que como parte del presente estudio se actualiza el catastro entre los años 2005 y 2011, utilizando con fuente de información datos de terreno y prensa (El Mercurio de Valparaíso y La Estrella de Valparaíso) y cuyos resultados se presentan en el Anexo E. Cabe señalar que el catastro incluye en la mayoría de los casos, la fecha de ocurrencia y/o publicación de los eventos, una descripción realizada por el medio de prensa (extraída en forma textual) y el tipo de remoción extraído a partir de la información periodística (posible de determinar sólo en algunos casos).

Del catastro realizado, se puede validar que los fenómenos más comunes están asociados a deslizamientos de roca y suelos, caídas de rocas, aluviones o flujos y socavamientos, los cuales ocurren principalmente en sectores escarpados o de mayor pendiente en los cerros de las ciudades de Valparaíso y Viña del Mar o en contorno de las terrazas marinas, y en muchos de los cuales el factor antrópico juega un rol fundamental. Los flujos, se han generado los últimos años a raíz de rebalse o rotura de matrices de agua (desencadenante antrópico) descendiendo por calles empinadas afectando a la población.

## 6.3 APLICACIÓN DE METODOLOGÍA DE LARA (2007) EN LA ZONA DE ESTUDIO

En una primera etapa, se procede a la aplicación directa de la metodología propuesta por Lara (2007) dentro del área urbana de la comuna de Viña del Mar. Lara (2007) propone trabajar a una escala entre 1:20.000 y 1:50.000, en un área de análisis de tipo hoya hidrográfica que no sobrepase las decenas de km<sup>2</sup>. Si bien el área de estudio morfológicamente no corresponde a una hoya hidrográfica, se procede a la división de la zona en unidades de análisis (escala 1:25.000) a partir de características geomorfológicas y geológicas-geotécnicas comunes, y utilizando además como límite pendientes mayores a 10  (Lara, 2007), definido a partir de una profunda revisión bibliográfica de rangos de pendientes generadoras de remociones.

El primer inconveniente radica en la escala de trabajo. La subdivisión del área en unidades de análisis supera lo recomendado por Lara (2007) en términos de cantidad (no sobrepasar las 150 unidades). La morfología aterrazada de Viña del Mar intercalada con quebradas y microcuencas, genera por un lado la definición de más de 300 unidades, y por otro lado, un área de análisis discontinua producto de la mezcla de fuertes pendientes con sectores planos (bajo el criterio de dejar fuera aquellas unidades con pendientes menores a  $10^\circ$ ).

Es importante señalar que esta mezcla de pendientes fuertes con pendientes suaves es una característica común de muchos terrenos urbanos en Chile (no sólo de Viña del Mar), generada por la geografía del territorio Chileno, la ocupación inicial de terrenos planos y la expansiones demográficas hacia los cerros (frecuente en franjas geomorfológicas de planicies litorales y en los faldeos de las cordilleras de la Costa y de los Andes).

La escala 1:25.000 utilizada para la aplicación de la metodología de Lara (2007) en algunos sectores dentro de la zona de estudio no permite obtener el nivel de detalle esperado del presente trabajo. Como prueba de ello, se aplican directamente las tablas propuestas por Lara (2007) en áreas pilotos dentro de la comuna (laderas rodeadas de urbanización y con evidencias de remociones recientes). Los resultados obtenidos no permiten diferenciar, por ejemplo, zonas que tengan una obra de estabilización mayor (con reducida a nula susceptibilidad) de zonas que tenga alta susceptibilidad, incluso dentro de una misma unidad. En base a lo anterior, se aplica la metodología propuesta por el presente trabajo a una escala 1:5000.

#### 6.4 DEFINICIÓN DE UNIDADES DE ESTUDIO

La escala de trabajo definida (1:5.000) y el nivel de detalle que se esperan de los resultados, obliga a definir sectores puntuales de estudio dentro de la comuna de Viña del Mar.

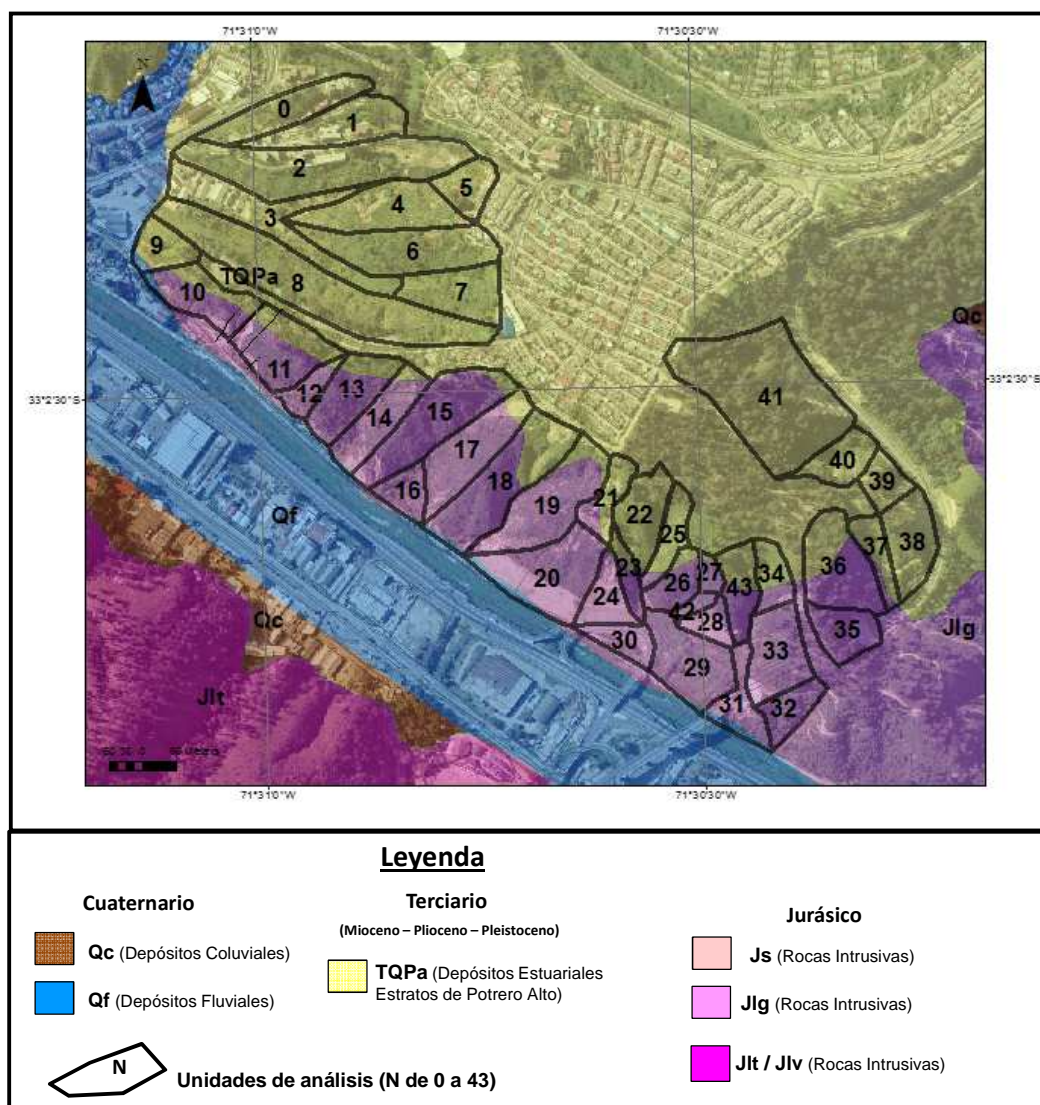
Los sectores escogidos para la aplicación y validación de la metodología, se basan por un lado en criterios geológicos geotécnicos, considerando que los sectores que sean lo más representativos en términos de tipo de remociones y materialidad. Además se incluyen en su definición criterios urbanos, como por ejemplo, áreas sin acceso restringido (para poder observar el terreno), zonas con alto tránsito o en el entorno de ejes viales importantes, (donde cualquier evento que implique la interrupción del tránsito tiene un alto impacto en la dinámica de la ciudad).

También se consideran algunas zonas con antecedentes de remociones en masa declaradas anteriormente, que permitan hacer un análisis retrospectivo y validar los resultados.

Finalmente a partir de varias iteraciones, se definieron 96 unidades de análisis distribuidas en 6 sectores dentro del área urbana de la comuna de Viña del Mar utilizando los criterios descritos anteriormente y dejando fuera aquellas unidades que tengan pendientes promedio menores a  $10^\circ$ , definido por Lara (2007) como el límite inferior para evaluar susceptibilidad de generación de remociones.

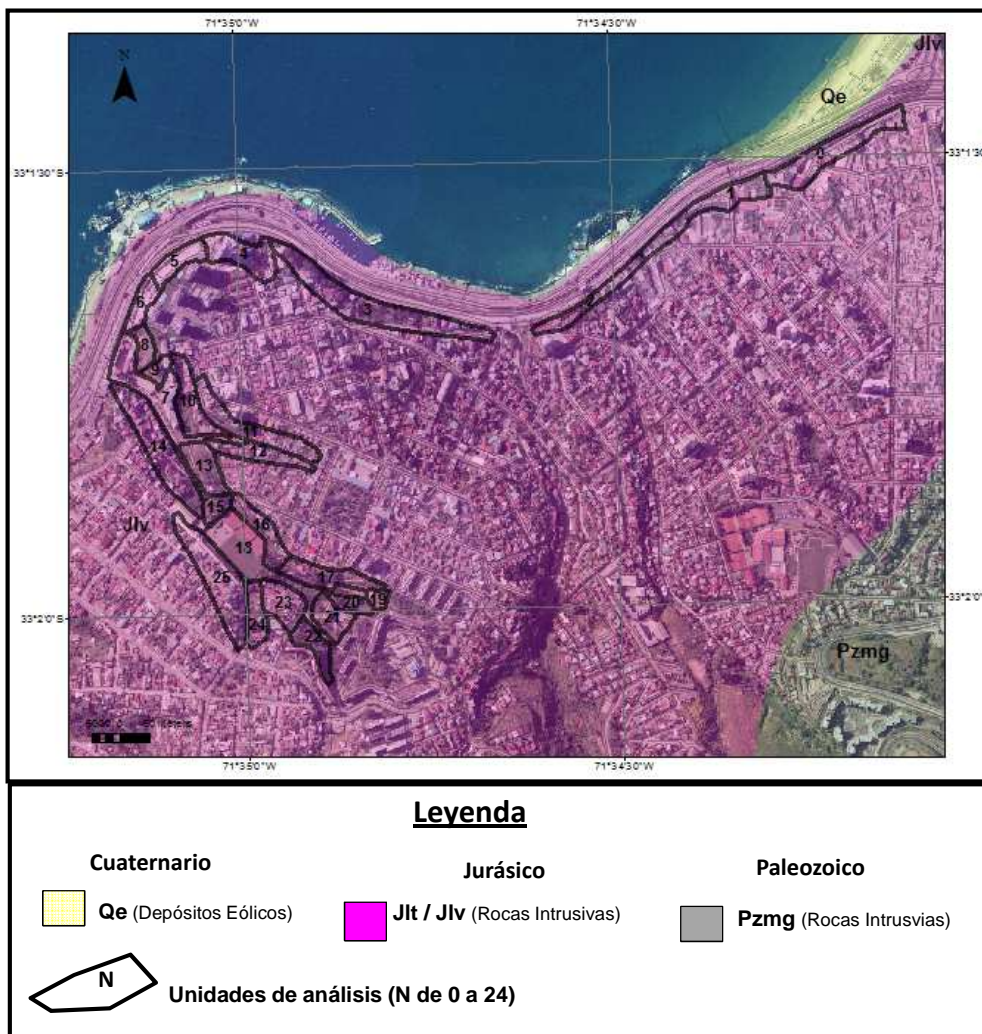
Los 6 sectores de análisis se denominaron en función del nombre que reciben dentro de la división comunal o por alguna infraestructura característica, y se presentan a continuación:

**Sector 1. Canal Beagle.** Estas 44 unidades están ubicadas en la ladera norte del estero Marga-Marga a la altura de El Salto, rodeando el sector de Canal Beagle ubicado en la cima de un sector aterrazado al este de la Ciudad (ver Figura 6.7). Geológicamente el área está compuesta por Intrusivos Jurásicos (Jlg) y la unidad Estratos de Potrero Alto (estuarial – TQP<sub>a</sub>), en el entorno de la falla Marga-Marga que pasaría por debajo del cauce del estero (Álvarez 1964). El sector incluye las laderas de acceso al sector de Canal Beagle por el oeste (subida Troncal) que conecta Viña del Mar con Quilpué, y las laderas de la ruta 60CH, que conectan vía Las Palmas con Reñaca Alto.



**Figura 6.7. Unidades de análisis sector Canal Beagle**  
Fuente: Elaboración Propia

**Sector 2. Recreo.** En este sector se incorpora parte de los taludes del sector Recreo que se orientan hacia Avenida España, eje conector principal entre Viña del Mar y Valparaíso. Específicamente se definió un área de análisis bordeando el acantilado costero (entre Caleta Abarca y la Escuela Industrial), incluyendo una zona de quebrada que desemboca en Av. España, con 26 unidades de análisis (ver Figura 6.8), ubicadas geológicamente en rocas intrusivas jurásicas (Jlv).



**Figura 6.8. Unidades de análisis sector Recreo**  
Fuente: Elaboración Propia

**Sector 3. 5 Oriente.** Este sector, incluye las laderas naturales que rodean el sector aterrizado de Sausalito - Santa Inés, en el límite NE de la Población Vergara o Plan de Viña de Mar. Este sector, se destaca por que el momento de dar inicio al estudio no estaba intervenido, sin embargo, al finalizar la presente Tesis, se encontraba intervenido producto de la construcción de una sede universitaria, quedando en evidencia el dinamismo de las zonas urbanas. Particularmente se definieron 8 unidades, dispuestas en rocas sedimentarias marinas (areniscas y limolitas de la unidad Tn) y taludes en rocas Jurásicas (unidad Js). Ver Figura 6.9.

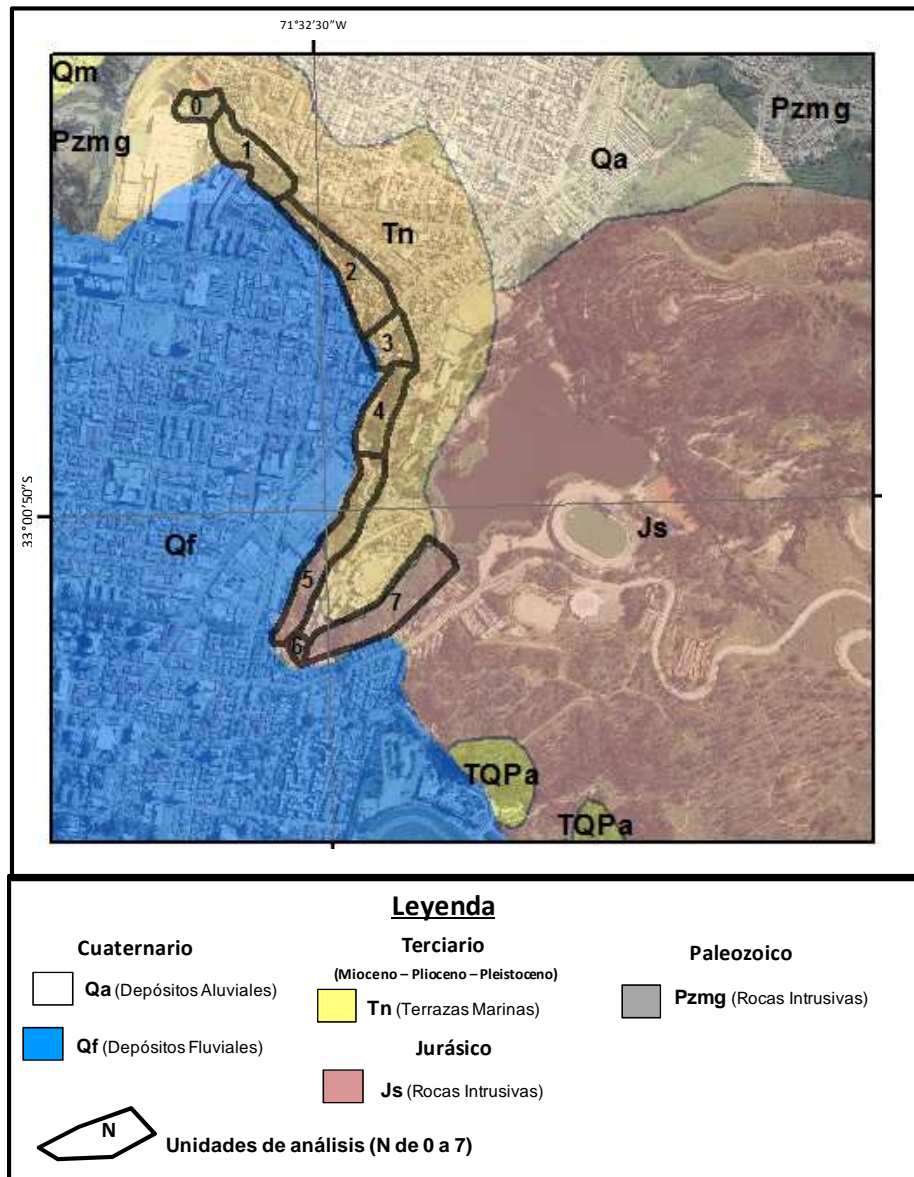
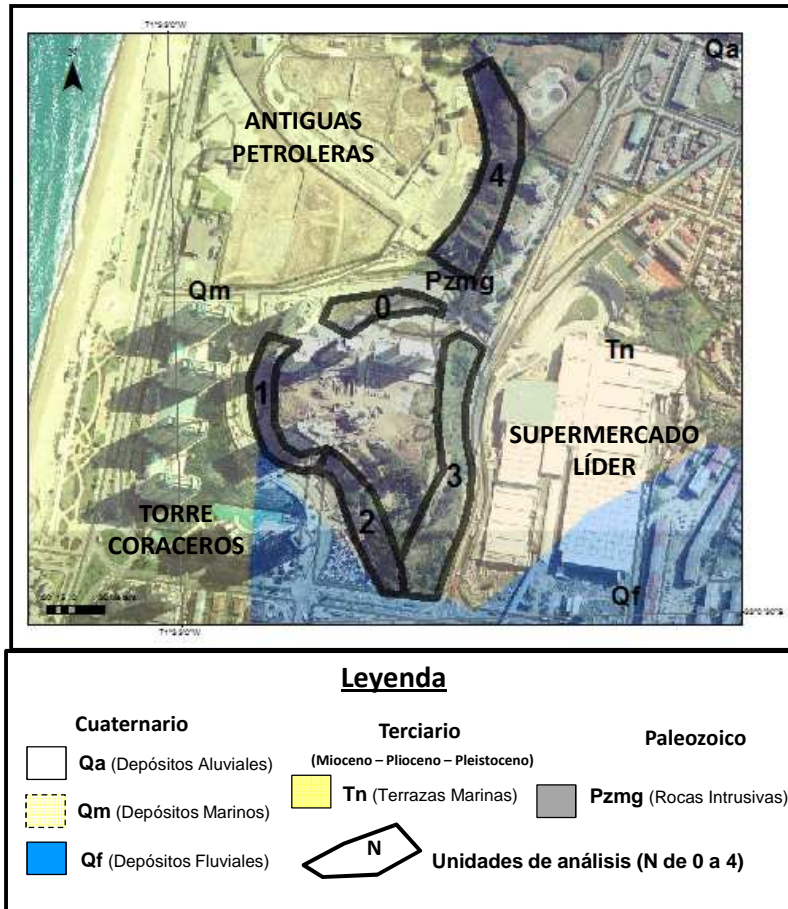


Figura 6.9. Unidades de análisis sector 5 Oriente  
Fuente: Elaboración Propia

**Sector 4. Coraceros.** Esta pequeña unidad de análisis (con sólo 5 unidades) se encuentra en un cerro isla al norte del Plan de Viña del Mar, incluyendo laderas de una terraza de abrasión marina donde antiguamente se ubicaban las petroleras. Todas estas unidades se encuentran en rocas intrusivas y metamórficas paleozoicas (en lo que Rivano et al., 1993, definió como Pzmg). Ver Figura 6.10.



**Figura 6.10. Unidades de análisis sector Coraceros**

Fuente: Elaboración Propia

**Sector 5. Cerro Castillo.** Las 9 unidades definidas en este sector rodean las laderas de Cerro Castillo, que en su mayoría se encuentran en rocas intrusivas jurásicas (Jlv) exceptuando la unidad 2, que se encuentra en rocas sedimentarias (areniscas y limolitas de origen marino - Tn). Ver Figura 6.11. Al igual que en los casos anteriores, este alto topográfico corresponde a un sector tipo terraza, con pendientes menores a 10° en su parte superior plana.

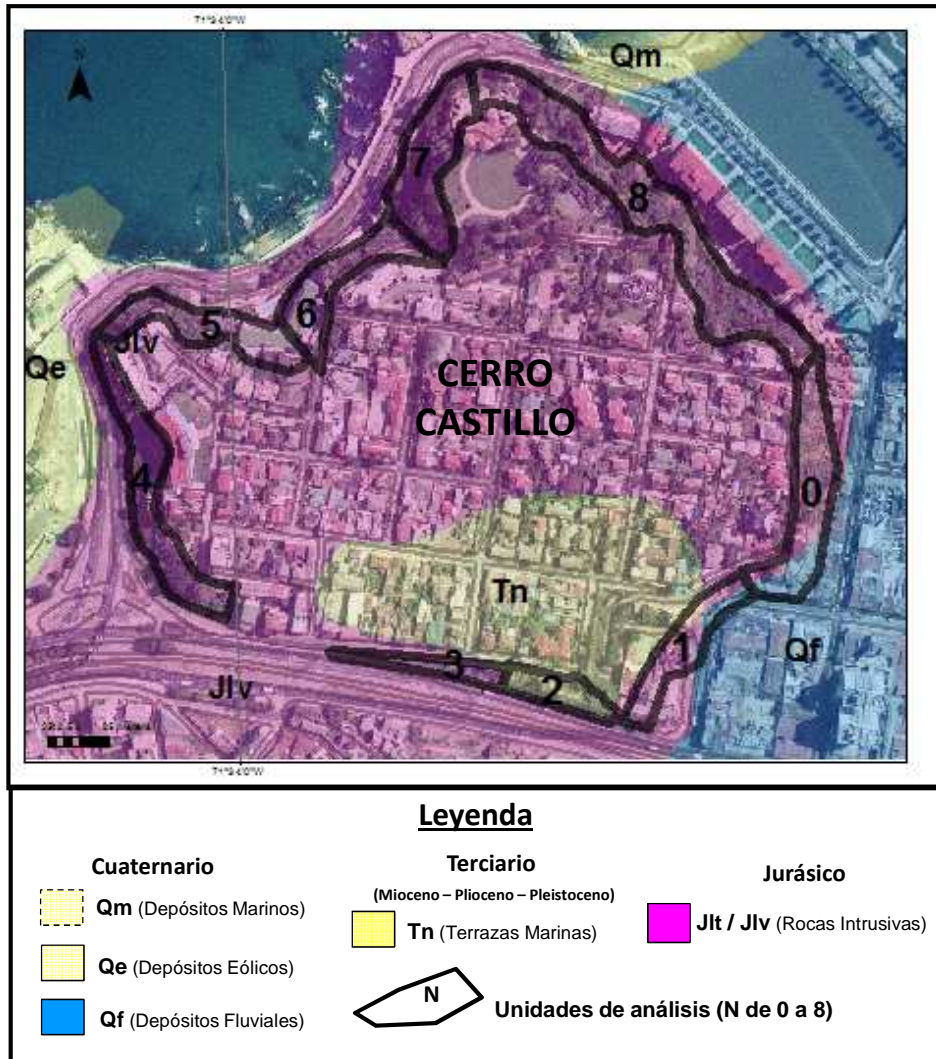
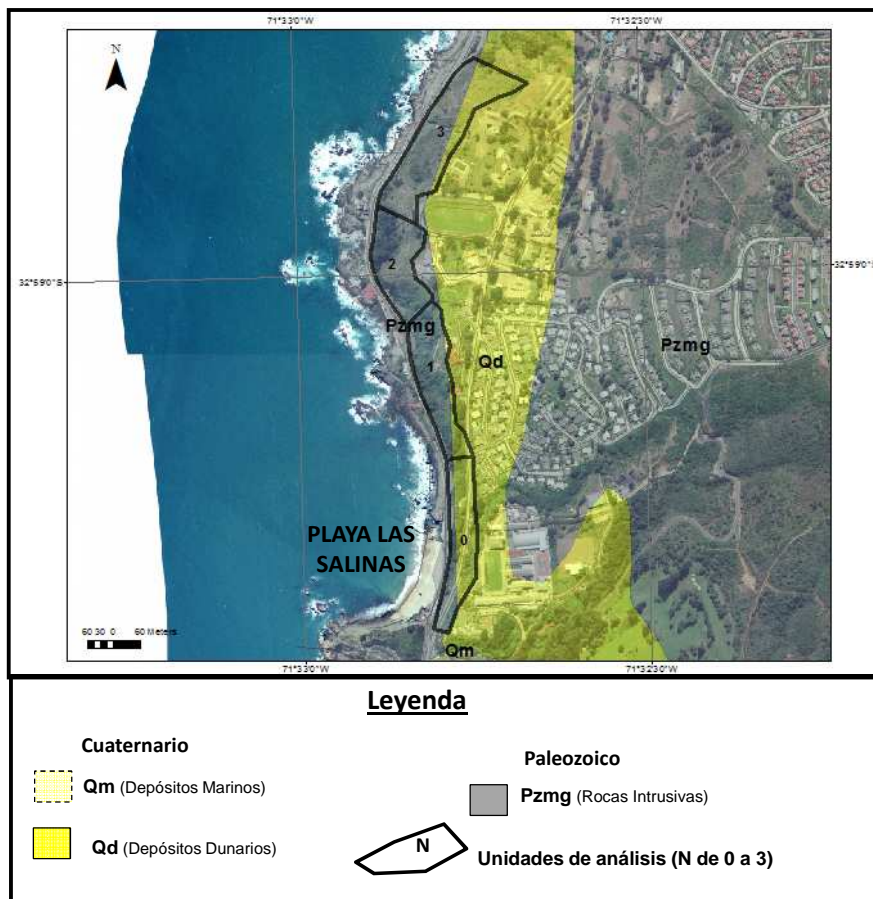


Figura 6.11. Unidades de análisis sector Cerro Castillo  
Fuente: Elaboración Propia

**Sector 6. Las Salinas - Reñaca.** Estas 4 unidades forman parte de los taludes costeros, naturales y antrópicos del camino que une la Playa Las Salinas con Reñaca (ver Figura 6.12) y están compuestos por rocas intrusivas y metamórficas paleozoicas cubiertas por paleodunas (Qd).





Como se puede apreciar en los 6 sectores escogidos para la aplicación de la metodología, las unidades corresponden geomorfológicamente a acantilados costeros o laderas que bordean niveles aterrizados de la ciudad, por lo que presentan en su cima pendientes menores a 10°.

#### 6.4.1 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LAS UNIDADES

A partir de la recopilación de información bibliográfica, visitas a terreno orientadas a caracterizar geotécnicamente las distintas unidades, toma de datos estructurales en forma puntual, caracterización del macizo rocoso mediante el RMR básico de Bieniawski (1989) y toma de muestras de suelo para ensayos in situ y en laboratorio se pueden identificar las siguientes unidades geotécnicas:

**Roca fresca.** Las unidades de roca intrusivas y metamórficas frescas (jurásicas y paleozoicas) se presentan en general como macizos de buena calidad geotécnica ( $RMR_B$  entre 60 y 80), con alta dureza (R5 según golpes de martillo geológico, equivalente a una resistencia a la compresión simple mayor a 100 MPa, según clasificación Brown (ISRM, 1981)). Los macizos se encuentran fracturados en bloques definidos por diaclasas con orientación dominantes de N45°W y N45°E, además de un sistema de rumbo NS (según información de terreno y estudio de López, 2004), que en

algunos casos generan bloques preformados sensibles a desprenderse o deslizar (tipo cuñas y fallas planas).

En el Anexo F se presentan fotografías representativas de algunas unidades de análisis definidas para cada sector y que resumen la condición descrita. En la Figura 6.13 se muestra la ubicación de mapeos de  $RMR_B$ .

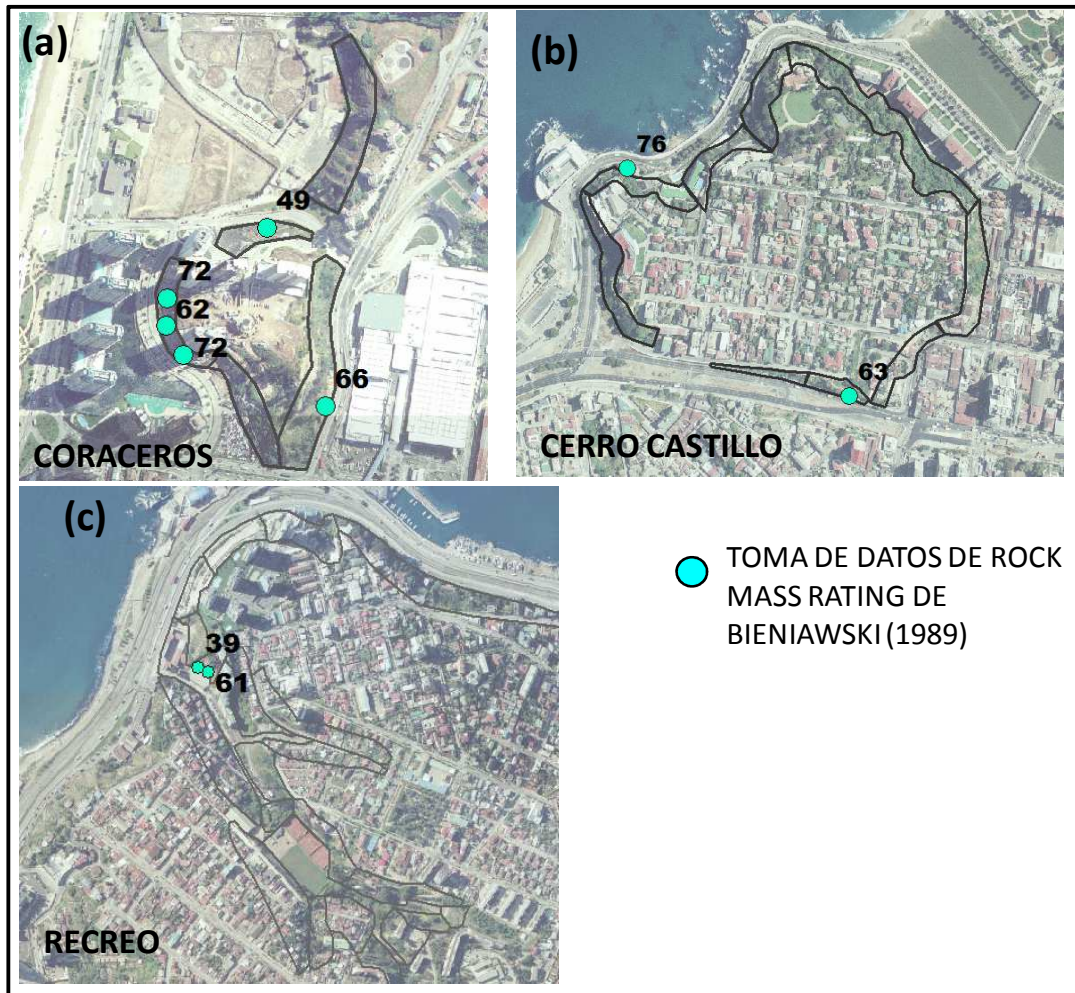


Figura 6.13. Ubicación de clasificación de macizo rocoso. (a) Sector Coraceros – Unidades 0, 1, 2, 3; (b) Sector Cerro Castillo Unidades 2 y 5; (c) Sector Recreo – Unidades 8 y 9

Fuente: Elaboración Propia

**Roca Meteorizada.** Esta unidad es frecuente en zonas con mayor humedad y vegetación, en laderas entorno a quebradas y/o con orientación sur y sureste. La roca (intrusiva o metamórfica) se encuentra altamente meteorizada por acción mecánica de raíces y humedad, con espesores de suelo residual que pueden alcanzar hasta los 5 metros y en los cuales se evidenciaron deslizamientos de suelo (ver Fotografías de Anexo F). En las zonas donde el porcentaje de suelo es menor, la roca meteorizada presenta regular a mala calidad geotécnica (en Figura 6.14), con  $RMR_B$  entre 20 y 50.

Para caracterizar el horizonte de suelos residuales in situ y roca meteorizada, se tomaron muestras en la unidad 14 de Recreo donde se hicieron 2 mediciones de densidad in situ a partir del uso de cono de arena. Las muestras tomadas se ensayaron en los Laboratorios de Docencia de Sólidos de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile (ensayos de corte directo en laboratorio). Los resultados indican que se trataría de suelos de tipo arena mal graduada muy poco cohesiva, obteniéndose densidades cercanas a  $0,013 \text{ ton/m}^3$ , valores de cohesión de  $0.3 \text{ Kp/cm}^2$  y ángulos de fricción ( $\emptyset$ ) de alrededor de  $38^\circ$ . Los detalles se presentan en el Anexo G. Estos valores fueron comparados con valores de literatura (Anexo H – valores de propiedades de rocas y suelos a partir de literatura), siendo consistentes con lo obtenido.

**Dunas y sedimentos eólicos.** Los sedimentos eólicos recientes (también llamados dunas activas) y aquellos estabilizados (paleodunas) presentan propiedades en función de su nivel de consolidación y profundidad. A partir de informes de mecánica de suelos del área de estudio e información bibliográfica (valores presentados en Anexo H), se puede estimar el peso específico húmedo ( $\gamma = 1,80 \text{ Ton/m}^3$ ), así como el ángulo de fricción interna  $\emptyset = 37^\circ$  y la cohesión efectiva mínima  $c = 0 \text{ Kp/cm}^2$ .

**Rocas Sedimentarias.** Tanto la secuencia de areniscas, limolitas, arcillolitas pertenecientes a la formación Navidad (Tn), como las intercalaciones de areniscas y conglomerados en la Formación Estratos de Potrero Alto (TQPa) fueron caracterizadas a partir de observaciones de terreno, donde se pudo estimar una calidad del macizo rocoso de regular calidad, dado principalmente por la estimación de la dureza a partir de golpes de martillo geológico (dureza R3 a R2 blanda ISRM 1981 en González de Vallejo et al., 2002), cohesión entre 80 y 350  $\text{Kp/cm}^2$  y ángulo de fricción interna de  $30^\circ$  a  $50^\circ$  (Anexo H).

**Depósitos recientes.** Los depósitos recientes de origen variable (aluvial, fluvial, marino, eólico, de remociones en masa) están por lo general en zonas planas, y no fueron caracterizados en terreno ya que no existían unidades de análisis en ellos.

La Tabla 6.1 muestra en términos generales los tipos de remociones en masa que se han identificado para cada geotécnica descrita (a partir del catastro de remociones en masa y observaciones de terreno), lo que será validado con la aplicación de la metodología propuesta por este trabajo.

#### 6.4.2 CLIMA Y VEGETACIÓN

La Región de Valparaíso presenta un clima templado mediterráneo, pero con algunas variaciones entre la costa, sectores centrales y sectores cordilleranos. Tanto el Océano Pacífico en general, como la corriente de Humboldt en particular, condicionan en gran medida la conducta de los elementos climáticos de la región. Las direcciones predominantes de los vientos, todas de componente oceánico y portadoras de humedad, explican la constante presencia de este factor en el clima regional y el carácter frío de la corriente de Humboldt determina la existencia permanente de una banda de bajas temperaturas vecinas a la costa, contribuyendo al descenso de las temperaturas continentales.

**Tabla 6.1**  
**Tipo de remociones en masa esperadas para cada unidad geotécnica**

UNIDAD GEOLÓGICA - GEOTÉCNICA		TIPO DE REMOCIÓN EN MASA				
UNIDAD GEOLÓGICA	UNIDAD GEOTÉCNICA	DESPLAZAMIENTO TRASLACIONALES DE ROCA	DESPLAZAMIENTO ROTACIONAL	CAÍDAS DE ROCAS	FLUJOS	DESPLAZAMIENTO SUPERFICIAL DE SUELOS
Pzmg, Pzmv, Jl, Jlv, Jlt	Roca Sana	x		x		
Pzmg, Pzmv, Jl, Jlv, Jlt	Roca Meteorizada / Suelo Residual			x		x
PQd, Qd	Dunas		x	x		x
Tn, Th, TQPa	Rocas sedimentarias (areniscas – conglomerados)			x		
Qf, Qm, Qrm,	Depósitos recientes - suelos - cobertura vegetal				x	x

Específicamente en la zona costera, se presenta un clima templado de tipo mediterráneo costero, presente en toda la costa y cuya influencia llega hasta el interior por medio de los valles. Las variaciones de temperaturas son menores por el influjo del océano, siendo más parejas durante el año con un promedio anual de 14°. La humedad relativa es alta con un 75% y las precipitaciones son más abundantes alcanzando unos 450 mm (fuente: Biblioteca del Congreso Nacional, <http://siit2.bcn.cl>).

La vegetación en la zona costera de la V Región de Valparaíso es de tipo matorral arbustivo costero formado por especies como el peumo, boldos y maitenes, junto a hierbas y gramíneas. En las áreas más húmedas como fondos de quebradas se pueden encontrar litres, quilas, pataguas (fuente: Biblioteca del Congreso Nacional, <http://siit2.bcn.cl>).

#### 6.5 APLICACIÓN DE METODOLOGÍA QUE EVALÚA SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN MASA EN ÁREAS URBANAS

La aplicación de la metodología en las 96 unidades de análisis permitió zonificar las áreas definidas como caso de estudio en función de la susceptibilidad ante remociones en masa tipo caídas de rocas, deslizamientos traslacionales de roca, deslizamientos rotacionales, deslizamientos superficiales de suelo y flujos. Los valores de susceptibilidad obtenidos para cada unidad y tipo de remoción de presentan en las Tablas 6.2 y 6.3, mientras que las Figuras 6.14 y 6.15 muestran ejemplos de los resultados obtenidos. El detalle de los mapas de susceptibilidad obtenidos en cada caso se muestran para cada sector se muestran en el Anexo I y en el Anexo J se muestra el detalle de los ponderadores por unidad para cada sector y tipo de remoción en masa estudiada.

## Índice de Susceptibilidad de Caídas de Rocas Sector Cerro Castillo



Figura 6.14. Mapa resultado mostrando Índice de Susceptibilidad ante Caídas de Rocas Sector Cerro Castillo  
Fuente: Elaboración Propia

## Índice de Susceptibilidad de Deslizamientos Traslacionales Sector 5 Oriente



Figura 6.15. Mapa resultado mostrando Índice de Susceptibilidad ante Deslizamientos Traslacionales de roca Sector 5 Oriente  
Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 6.2**  
**Resultados sectores Canal Beagle y Reñaca- Las Salinas**

SECTOR	UNIDAD	PENDIENTE	CAÍDAS DE ROCAS	DESPLAZAMIENTOS TRASLACIONALES DE ROCA	DESPLAZAMIENTOS ROTACIONALES	DESPLAZAMIENTOS SUPERFICIALES DE SUELO	FLUJOS
CANAL BEAGLE	0		50	0	42	47	0
CANAL BEAGLE	1		0	0	39	41	0
CANAL BEAGLE	2		62	0	43	54	0
CANAL BEAGLE	3		0	0	0	36	71
CANAL BEAGLE	4		51	0	41	54	0
CANAL BEAGLE	5		61	0	43	54	0
CANAL BEAGLE	6		0	0	38	41	0
CANAL BEAGLE	7		0	0	38	41	0
CANAL BEAGLE	8		0	0	49	56	0
CANAL BEAGLE	9		43	0	47	58	0
CANAL BEAGLE	10		77	70	0	67	0
CANAL BEAGLE	11		77	65	0	63	0
CANAL BEAGLE	12		63	44	0	63	53
CANAL BEAGLE	13		71	56	0	68	0
CANAL BEAGLE	14		81	69	0	70	0
CANAL BEAGLE	15		77	69	0	70	0
CANAL BEAGLE	16		0	31	0	43	55
CANAL BEAGLE	17		62	42	0	63	0
CANAL BEAGLE	18		55	47	0	60	57
CANAL BEAGLE	19		55	47	0	65	61
CANAL BEAGLE	20		58	49	0	58	0
CANAL BEAGLE	21		0	0	0	34	0
CANAL BEAGLE	22		0	0	43	51	57
CANAL BEAGLE	23		60	0	48	62	60
CANAL BEAGLE	24		58	65	0	53	0
CANAL BEAGLE	25		0	0	49	53	55
CANAL BEAGLE	26		0	0	0	56	57
CANAL BEAGLE	27		0	0	0	48	0
CANAL BEAGLE	42		59	38	0	60	0
CANAL BEAGLE	28		54	69	0	40	0
CANAL BEAGLE	29		0	0	0	48	0
CANAL BEAGLE	30		0	0	0	55	0
CANAL BEAGLE	31		0	0	0	63	0
CANAL BEAGLE	32		0	0	0	54	0
CANAL BEAGLE	33		0	0	0	49	0
CANAL BEAGLE	34		0	0	39	53	53
CANAL BEAGLE	35		0	41	0	55	0
CANAL BEAGLE	36		0	0	0	41	0
CANAL BEAGLE	37		0	0	36	39	0
CANAL BEAGLE	38		62	32	42	43	0
CANAL BEAGLE	39		58	29	41	43	0
CANAL BEAGLE	40		0	0	38	41	0
CANAL BEAGLE	41		58	32	44	44	0
CANAL BEAGLE	43		0	27	42	47	55
REÑACA SALINAS	0		0	0	31	28	0
REÑACA SALINAS	1		64	61	44	41	0
REÑACA SALINAS	2		65	62	45	42	0
REÑACA SALINAS	3		49	0	46	41	0

**Tabla 6.3**  
**Resultados sectores Coraceros, Cerro Castillo, 5 Oriente y Recreo**

SECTOR	UNIDAD	PENDIENTE	CAÍDAS DE ROCAS	DESIZAMIENTOS TRASLACIONALES DE ROCA	DESIZAMIENTOS ROTACIONALES	DESIZAMIENTOS SUPERFICIALES DE SUELO	FLUJOS
CORACEROS	0		41	24	0	41	0
CORACEROS	1		30	42	0	0	0
CORACEROS	2		29	26	0	34	0
CORACEROS	3		58	56	0	49	0
CORACEROS	4		62	59	0	55	0
CERRO CASTILLO	0		26	0	0	35	0
CERRO CASTILLO	1		0	0	0	0	0
CERRO CASTILLO	2		76	0	0	0	0
CERRO CASTILLO	3		69	66	0	52	0
CERRO CASTILLO	4		0	0	0	38	0
CERRO CASTILLO	5		58	54	0	43	0
CERRO CASTILLO	6		57	55	0	40	0
CERRO CASTILLO	7		54	55	0	42	0
CERRO CASTILLO	8		61	56	0	62	0
5 ORIENTE	0		27	36	0	0	0
5 ORIENTE	1		49	33	0	0	0
5 ORIENTE	2		17	15	0	0	0
5 ORIENTE	3		51	35	0	0	0
5 ORIENTE	4		60	53	0	51	0
5 ORIENTE	5		58	52	0	52	0
5 ORIENTE	6		56	50	0	49	0
5 ORIENTE	7		58	52	0	52	0
RECREO	0		68	69	0	63	0
RECREO	1		18	29	0	37	0
RECREO	2		25	24	0	32	0
RECREO	3		65	60	0	62	0
RECREO	4		33	0	0	61	0
RECREO	5		11	40	0	0	0
RECREO	6		11	34	0	0	0
RECREO	7		0	0	0	0	70
RECREO	8		70	70	0	62	0
RECREO	9		71	70	0	63	0
RECREO	10		53	47	0	41	0
RECREO	11		41	0	0	55	0
RECREO	12		42	0	0	57	0
RECREO	13		44	0	0	57	0
RECREO	14		58	0	0	66	0
RECREO	15		42	0	0	54	0
RECREO	16		0	0	0	53	0
RECREO	17		0	0	0	36	0
RECREO	18		0	0	0	24	73
RECREO	19		0	0	0	44	0
RECREO	20		0	0	0	41	0
RECREO	21		0	0	0	36	0
RECREO	22		0	0	0	42	0
RECREO	23		0	0	0	43	0
RECREO	24		0	0	0	43	0
RECREO	25		0	0	0	43	0



Los resultados obtenidos fueron validados con datos de terreno, pudiéndose comprobar que en la zona de estudio (en las distintas áreas de análisis escogidas) los principales tipos de remociones en masa son de tipo caídas de rocas, deslizamientos traslacionales de roca y deslizamientos de suelo, sólo existiendo IS mayores de 50 para flujos en unidades puntuales. De los sectores escogidos, ninguno presentó IS mayor a 50 para deslizamientos rotacionales.

Además, como era esperable, la presencia de obras antrópicas robustas en algunos casos juegan un rol fundamental en la reducción de susceptibilidad.

A modo de ejemplo se realiza el análisis de estabilidad de laderas en dos casos representativos (uno de caídas de rocas y el otro de deslizamientos superficiales de suelo) según las técnicas descritas en el Anexo C, mostrando una forma de abordar la problemática a partir de los planos de susceptibilidad.

En este caso, se entregara la probabilidad de falla o factor de seguridad de estas laderas representativas. Los casos escogidos son:

- Caso 1. Unidad 14 sector Recreo por remoción en masa de tipo deslizamiento superficial de suelo. IS = 66
- Caso 2. Unidad 2 sector Cerro Castillo por caídas de rocas (IS = 76)

El detalle y resultados específicos se presentan en Anexo K (Ejemplo de análisis de estabilidad).

## **CAPÍTULO 7. SUSCEPTIBILIDAD DE RESPUESTA SÍSMICA POR FALLA MARGA-MARGA, CIUDAD DE VIÑA DEL MAR**

La falla Marga-Marga ha sido estudiada o mencionada por diversos autores, tanto en trabajos de interés geológico, sismológico, geográfico, obras civiles, entre otros, y tanto su traza definitiva, así como posibles movimientos recientes o amplificación ante eventos sísmicos, son temas de permanente interés.

En el presente capítulo se presenta la aplicación de la metodología definida para estimar susceptibilidad de respuesta sísmica por fallas mayores en áreas urbanas en el estudio de caso de la falla Marga-Marga en Viña del Mar.

En una primera etapa se realiza una profunda recopilación de antecedentes de la falla (presentados a continuación) y luego se aplica la metodología propuesta por este trabajo.

### **7.1 ANTECEDENTES Y ESTUDIOS ANTERIORES**

#### **7.1.1 ANTECEDENTES GEOLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS**

Como se presentó en el Capítulo 5.2, la rectitud que presentan las quebradas principales de la región (en su mayoría de orientación noroeste) ha sido interpretada como parte de lineamientos con fuerte control estructural (Álvarez, 1964), debido a que fallas y diaclasas debilitarían el macizo permitiendo zonas de escurrimiento de agua.

Además, la dificultad que presenta la correlación entre los distintos niveles de terrazas en ambos lados de estas quebradas, ha sido interpretada como dislocaciones tectónicas producto del desplazamiento de los bloques a través de fallas verticales durante el cuaternario (Álvarez, 1964; Castro y Brignardello, 1997). En el caso particular de Viña del Mar, al norte del estero Marga-Marga (conocido también como estero Viña del Mar en el sector urbano) se identifica una terraza de abrasión de 220 m s.n.m., y cuya correlación al sur del estero no es posible, donde los niveles aterrazados alcanzan cotas superiores.

Álvarez (1964) define una traza de la falla Marga-Marga a partir de estudios anteriores y datos recopilados en terreno (Ver Figura 7.1), la cual atraviesa por debajo del Plan de la ciudad (línea segmentada) alineándose con el valle del estero homónimo, con rumbo N40°W a N60°W y manteo subvertical.

Según Álvarez (1964) el movimiento que ha presentado la falla incluye un desplazamiento de tipo rumbo dextral, con movimiento del bloque norte de la falla hacia el sureste. Esta hipótesis se sustenta en el desplazamiento de la unidad Gn (Gneiss de transición definida por el autor) en cerca de 3 kilómetros respecto a la traza de la falla. El autor también describe un movimiento con componente vertical evidenciado por la dislocación entre las terrazas (salto de 90 a 100 metros) desde el Plioceno. El autor señala que estos movimientos cuaternarios de la falla quedan en evidencia por la perturbación de sedimentos estuariales reconocidos en la zona (Que según Álvarez, 1964) ubicados al norte del estero, fracturándolos e inclinándolos levemente hacia el noreste, señalando además que la expresión topográfica de la falla es excelente, alcanzando un sector recto mucho más al este que la cobertura de su mapa 1:50.000.

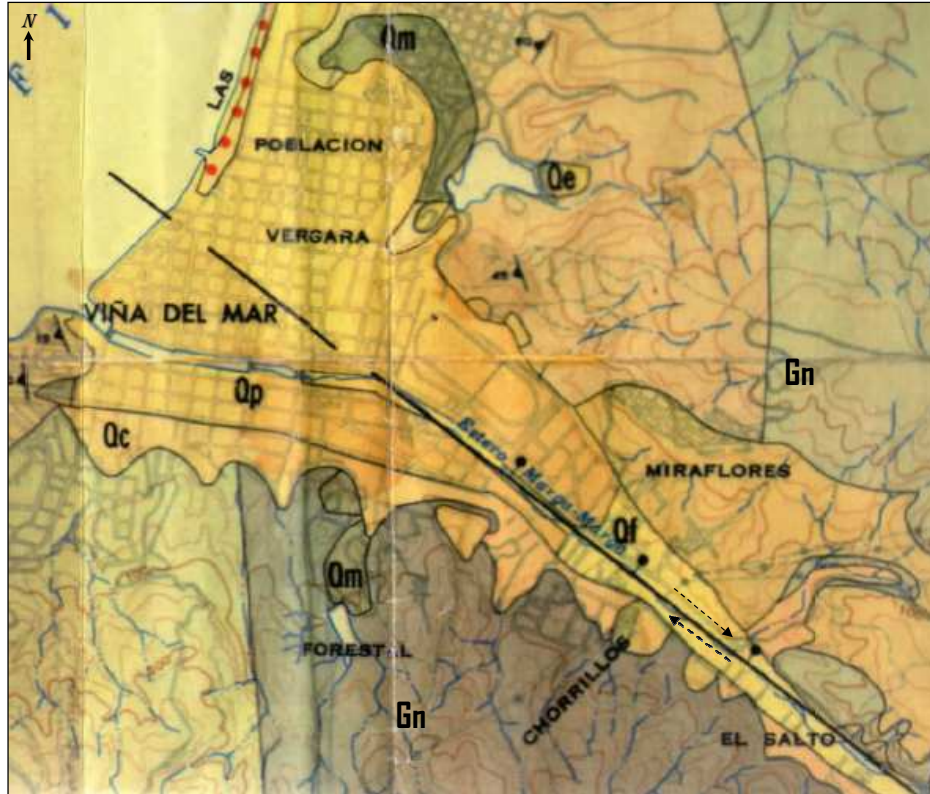


Figura 7.1. Extracto de mapa Geología del Área de Valparaíso y Viña del Mar escala 1:50.000 (Álvarez, 1964) mostrando traza de falla Marga-Marga en la Población Vergara (Viña del Mar). Fuente: Álvarez, 1964. IIG, Boletín N° 16.

En el Mapa Geológico del área Valparaíso – Curacaví (Gana et al., 1996) se reconoce un conjunto de fallas y lineamientos con orientación N50°W, un ancho aproximado de 5 km y más de 30 km de largo que definen la falla Marga-Marga (Gana et al., 1996) y Figura 7.2. Específicamente en la comuna de Viña del Mar (ver Figura 7.3), los autores reconocen una estructura a unos 500 metros al sur del actual cauce del estero homónimo, que habría generado hundimiento del bloque suroeste (al revés de lo indicado por Álvarez, 1964).

En el presente trabajo se valida la ubicación de la traza definida por Gana et al. (1996) mediante observación de fotografías con técnicas estereoscópicas y visitas a terreno. Como se muestra en la Figura 7.3, la falla atravesaría un talud artificial de la ruta Las Palmas. En dicho corte se reconoce la presencia de una falla de aproximadamente 30 centímetros de espesor (rumbo N60°W y manteo subvertical), más algunas fracturas de gran longitud y diques altamente fracturados que cortan la roca intrusiva, sin embargo, no se reconoce el movimiento de bloque sur hundido (Fotografía 7.1).

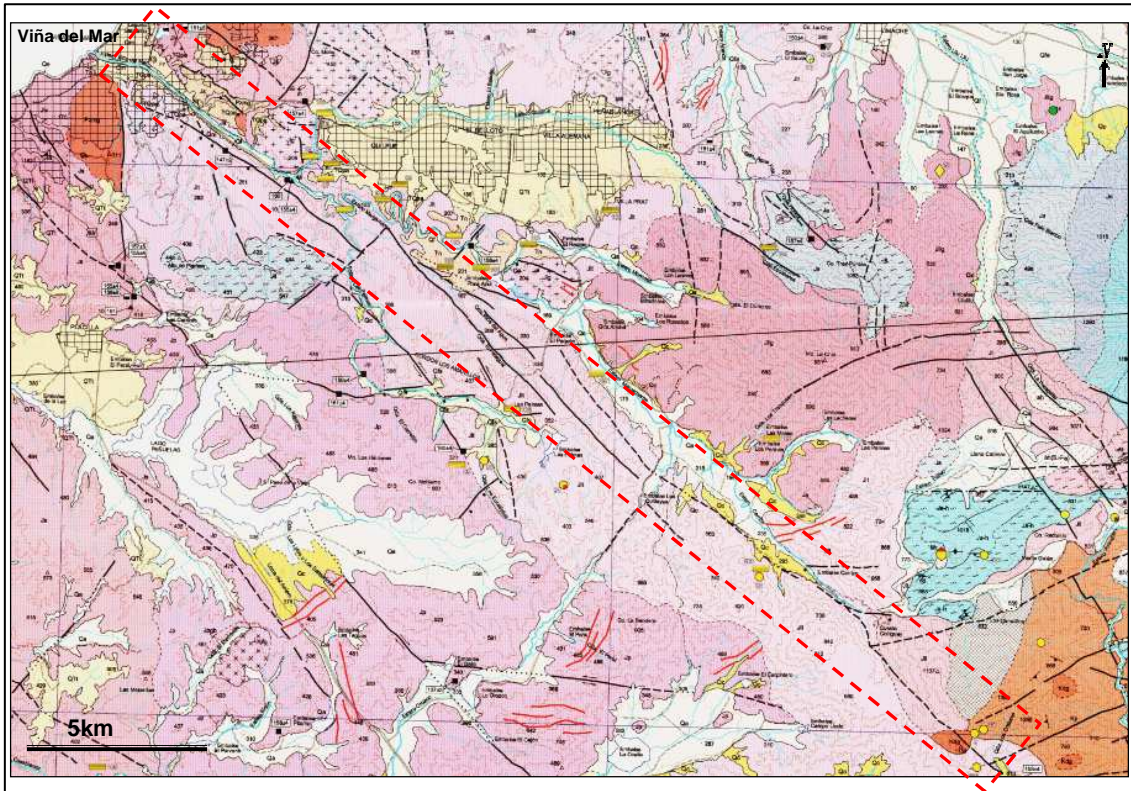


Figura 7.2. Extracto de Mapa Geológico Área Valparaíso – Curacaví (Gana et al., 1996) mostrando con línea roja el sistema de fallas Marga-Marga  
Fuente: Modificado de Gana et al., 1996.

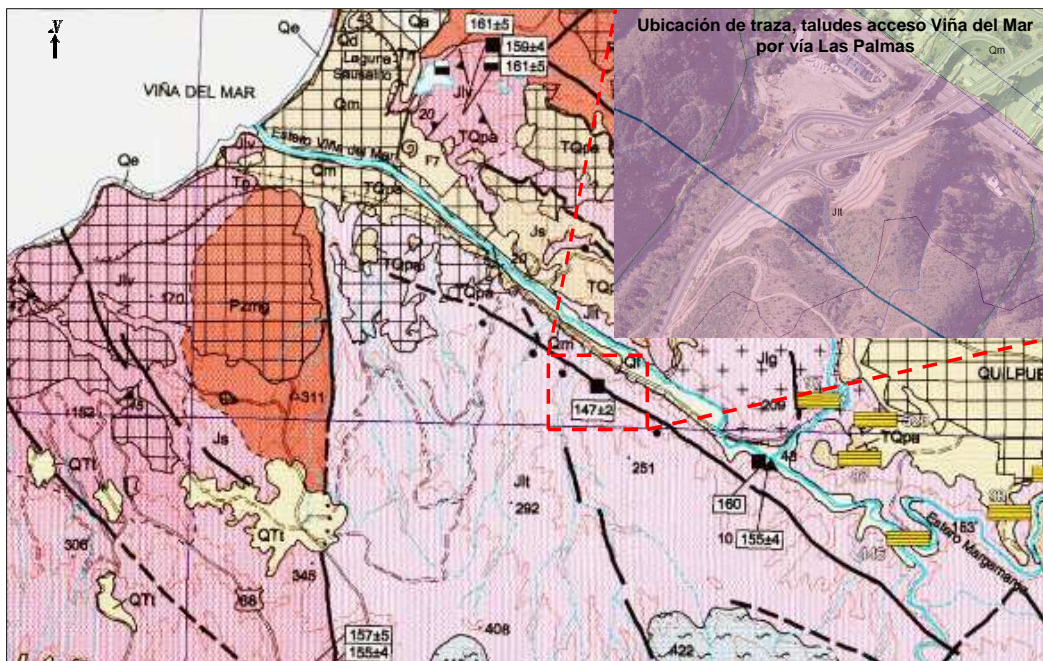


Figura 7.3. Extracto de Mapa Geológico Área Valparaíso – Curacaví (Gana et al., 1996) mostrando la traza de la falla Marga-Marga en el entorno de la ciudad de Viña del Mar.  
Fuente: Modificado de Gana et al., 1996.



**Fotografía 7.1. Talud ruta Las Palmas en dirección a Viña del Mar donde se reconoce falla que correspondería a la traza mapeada por Gana et al. (1996) asociada a la falla Marga-Marga. Fuente: Obtención propia**

Otro estudio que aporta una gran cantidad de antecedentes y evidencias de la geología del cuaternario y de la falla Marga-Marga en Viña del Mar, es el realizado por Thorson (1999).

Como parte de los antecedentes presentados en dicho estudio, se mencionan evidencias que dan cuenta de una rápida profundización del cauce del estero controlado por la presencia de la falla. Mediante la correlación de los depósitos de Estratos de Potrero Alto (TQPa) a ambos lados del estero, Thorson (1999) plantea la gran amplitud que cauce en el pasado (Plioceno-Pleistoceno), pero que sin embargo ha presentado una rápida profundización producto de la presencia de la falla y su potencial actividad, generando un cañón recto y estrecho con pequeñas quebradas tributarias bajo la cota 200 y pendientes de las laderas por sobre 25°. Según Keller and Pinter (1999) en Thorson (1999) estas características se consideran diagnósticas de una rápida profundización. En términos geológicos, en el presente trabajo también fue posible validar la presencia y correlación de depósitos estuariales de Estratos de Potrero Alto a ambos lados del actual cauce.

Dentro de las evidencias de terreno presentadas por Thorson (1999) que le permiten confirmar la existencia de la falla geológica por debajo del estero homónimo entre El Salto y el Plan de Viña del Mar, se menciona el reconocimiento de una zona de fractura brechizada en zonas de roca intrusiva, cuyo espesor varía entre 0.1 a 1.2 metros. Esta

zona de brecha habría sido reconocida entre Chorrillos y El Salto, específicamente en la cara suroeste del valle, revelando con rumbo exacto paralelo al valle y manteando 85° al suroeste (ver Figura 7.4).

A su vez, dentro de la zona brechizada Thorson (1999) reconoce fragmentos individuales con incrustaciones ricas en arcillas no meteorizada, salbanda de falla gris verdosa con estructuras en echelon (escalón) pero sin claras marcas de movimiento. El relleno de salbanda presentaba un brillo indicando el alineamiento de partículas microscópicas. Según el autor, estas características son diagnósticas de una zona de cizalle en ambientes de alto estrés. En el mismo sitio, la zona de falla se extendería en forma continua hacia a una elevación de 60 metros, hasta el contacto entre roca no alterada y la cobertura de arenas. El abultamiento reconocido en los lentes de arenas (entre 1 y 3 metros) serían indicadores que éste esarpe ya estaba presente durante la depositación.

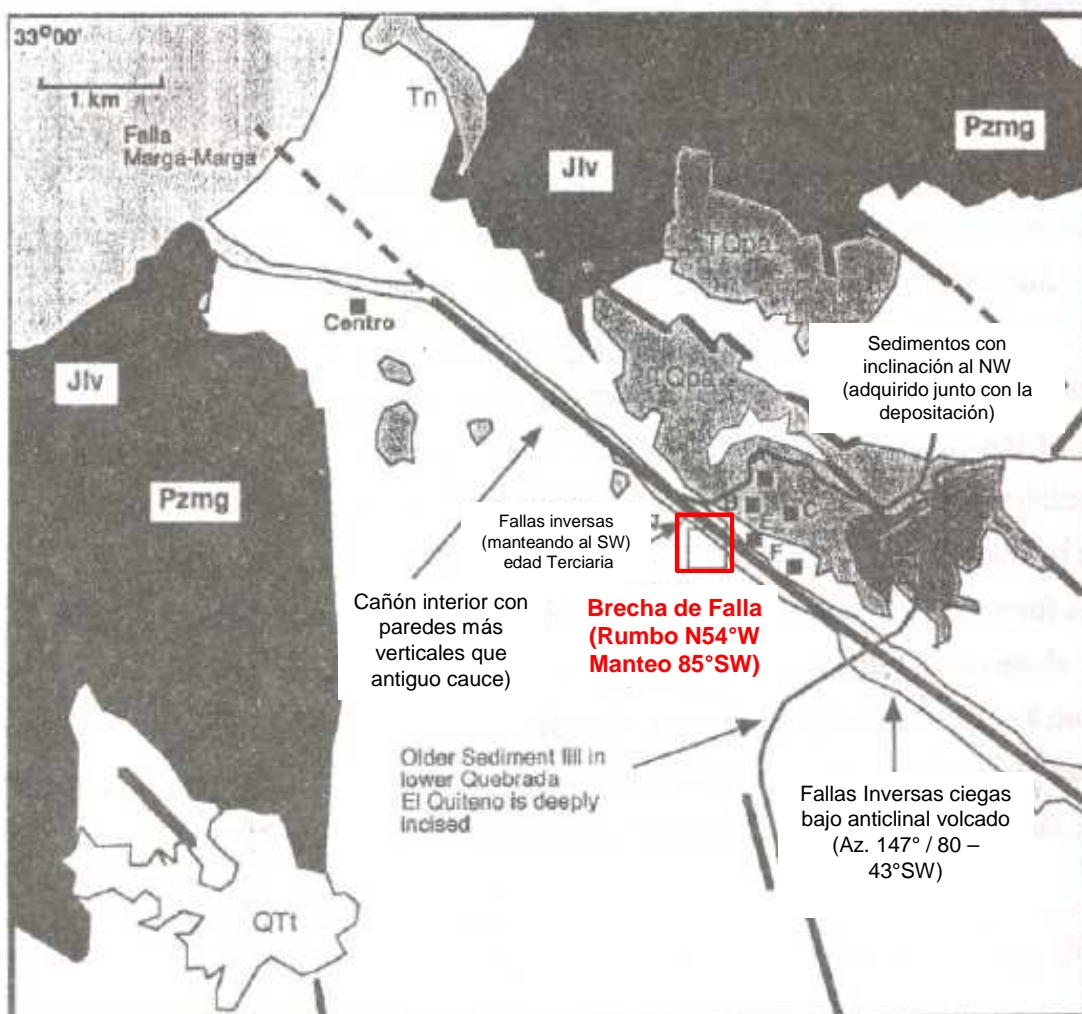
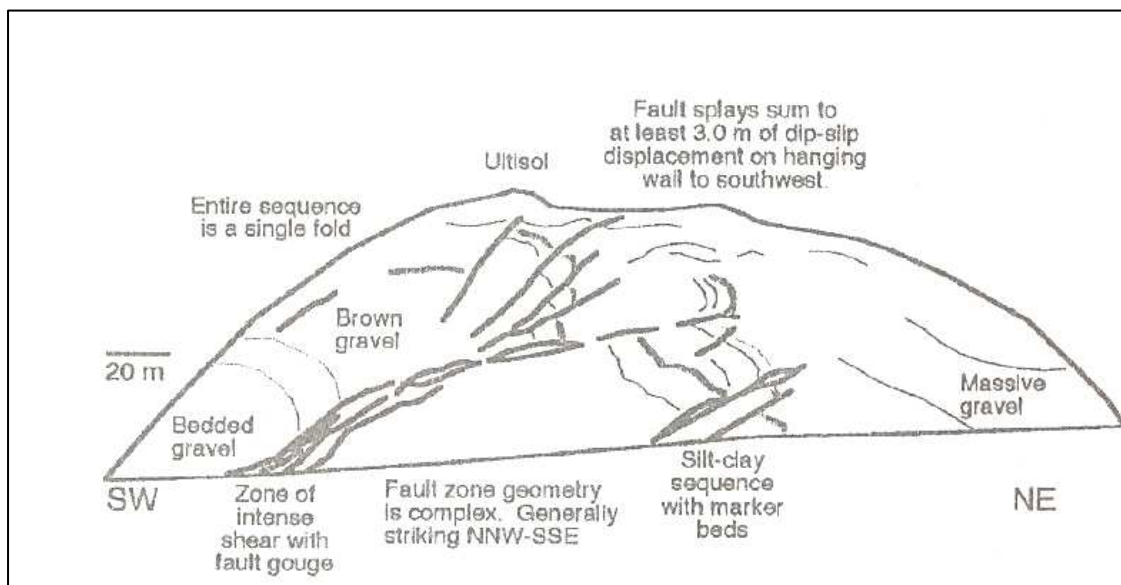


Figura 7.4. Mapa presentando evidencias de terreno reconocidas por Thorson (1999). Se destaca el reconocimiento de una zona de brecha de falla con presencia de microestructuras. Fuente: Thorson, 1999.

Según Thorson (1999) las evidencias de deformación secundaria y que indicarían que la falla ha presentado actividad reciente (en el cuaternario) serían producto del reconocimiento de fallas inversas ciegas, interpretadas como una consecuencia de la actividad de la falla Marga-Marga, lo que indicaría un movimiento inverso sinistral (strike slip) en el pasado geológico reciente, generado por la transferencia de desplazamiento de una falla a otra. Esta condición se reconoce dentro de los depósitos más viejos de la unidad Estratos de Potrero Alto (TQPa), expuesta en los cortes entre el túnel del Jardín Botánico y la parte alta de Canal Beagle (Ver Figura 7.5). Durante el desarrollo del presente trabajo se obtuvieron antecedentes adicionales de los puntos exactos visitados por Thorson (1999) en los cuales observó deformación en suelos recientes (Thorson comunicación personal). Sin embargo, en la actualidad la vegetación actual impide visualizar dicha deformación en suelos recientes.



**Figura 7.5. Esquema presentado por Thorson (1999) indicando evidencias de actividad cuaternaria de la falla Marga-Marga en depósitos de Estratos de Potrero Alto (TQPa) y suelos cuaternarios.**

**Ambos depósitos serían cortados por fallas inversas continuas en el afloramiento que se propagan hacia arriba de la pila de sedimentos, terminando justo bajo superficie, aparentemente deformada.**

**Fuente: Thorson (1999).**

#### 7.1.2 ANTECEDENTES SÍSMICOS DEL AREA

En la zona de Chile Central, específicamente en la zona de los valles transversales entre los 27° y 33° de Latitud Sur, la placa de Nazca parece pegarse bajo el continente sudamericano y desciende bajo la Cordillera de los Andes y Argentina con un ángulo muy pequeño de solo unos 10° de inclinación (Madariaga, 1998), en lo que se conoce como zona de subducción plana o “flat-slab”. Si bien esta condición podría afectar la ausencia de volcanismo activo en el área (el ángulo de subducción bajo impediría la fusión de la cuña astenosférica), se reconoce sismicidad en las mismas fuentes descritas anteriormente en el Capítulo 2.2.

La V Región de Valparaíso se ha visto afectada históricamente por sismos generados en el contacto de ambas placas tectónicas (zona de Wadati-Benioff) como a los ocurridos en los años 1575, 1647, 1730, 1822, 1906, 1985 y 2010 (Ruiz y Saragoni, 2005). Según Comte et al. (1986), todos esos sismos obedecerían a un mecanismo de tipo subducción, estimando un período de recurrencia de  $82 \pm 6$  años. Sin embargo, el terremoto del Maule del 2010 dejó evidencias que sismos gatillados más al sur de la zona de estudio (zona centro – sur entre los  $35^\circ$  y  $40^\circ$  latitud sur: terremotos 1570, 1657, 1751, 1835, 1928 y Maule 2010) también pueden afectar el área de análisis, generándose un acoplamiento entre dos zonas de ruptura de las placas (Belmonte, comunicación oral).

Según información obtenida a partir de catálogos sísmicos públicos, como el del Servicio Sismológico del Dpto. de Geofísica de la U. de Chile (GUC) y el National Earthquake International Center (NEIC), no existirían registros de sismicidad difusa cercana a superficie en el área de estudio (menor a 30 kilómetros de profundidad).

### 7.1.3 ANTECEDENTES DE DAÑOS EN EL PLAN DE VIÑA CAUSADOS POR SISMOS HISTÓRICOS

#### 7.1.3.1 EL TERREMOTO DEL 16 DE AGOSTO DE 1906.

El terremoto de 1906 se enmarca dentro de la secuencia de grandes sismos históricos en Chile Central, quedando bastantes registros y evidencias históricas del daño ocasionado. Este evento se habría extendido entre Los Vilos y la localidad de Llico-Vichuquén (a la altura de Curicó), con magnitud estimada de 8.2 (fuente: Historic World Earthquakes NEIC - USGS).

Las fuentes históricas consultadas (El Mercurio de Valparaíso y la recopilación hecha por Rodríguez Rozas et al., 1906), más los antecedentes recopilados por Thorson (1999) que cita a Ballore (1915) y Larraín (1946) describen los daños en la ciudad de Viña del Mar por este sismo y sugieren la posibilidad que la falla Marga-Marga haya tenido un rol en los daños registrados.

Dentro de las localidades en Viña del Mar que fueron fuertemente dañadas con el terremoto, se mencionan la Población Vergara (Plan de Viña del Mar) y cercanías de calles Valparaíso con Limache. En este último sector, Rozas y Cruzat (1906) describen la presencia de una grieta que se abrió al momento de la fuerte sacudida y por donde fue expulsada agua turbulenta (licuefacción). El Mercurio de Valparaíso también reporta que ese sector es la parte de Viña que más se vio afectada por el sismo. Otro sector reportado como de gran intensidad es El Salto, donde se entrega como antecedente adicional el daño sufrido en la vía de ferrocarril, la cual fue completamente destruida entre El Salto y Quilpué. En este punto Ballore (1915) describe que la pista sufrió daño con un patrón en zig-zag, cortando los pernos de anclaje y existiendo agrietamiento, sugiriendo que el terreno habría sido cizallado por superficies horizontales de ruptura.

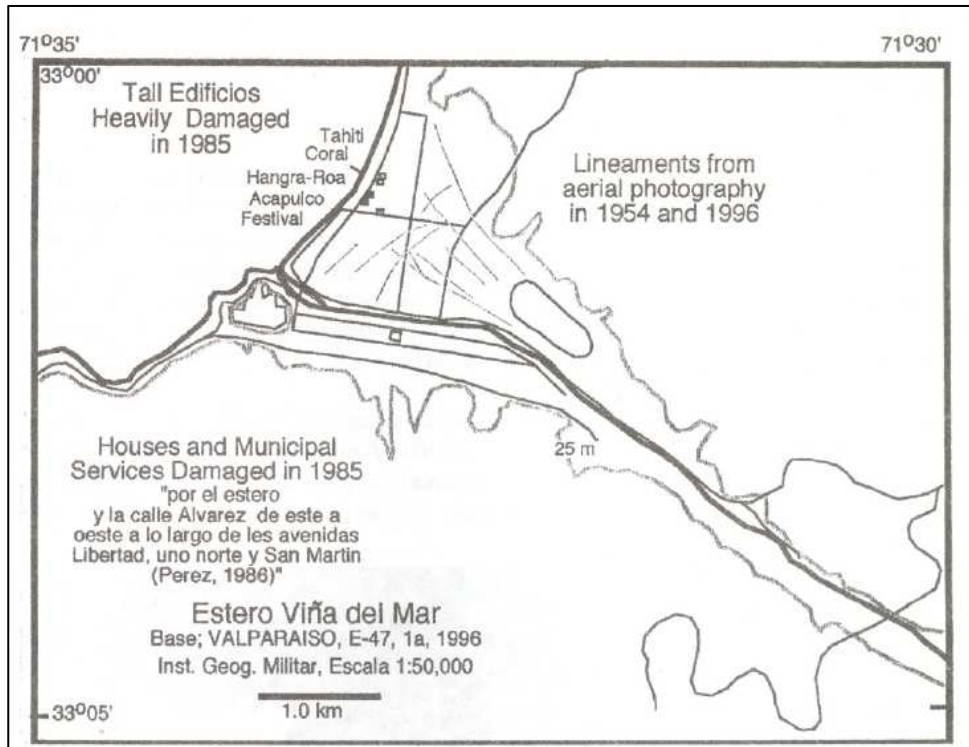


### 7.1.3.2 EL TERREMOTO DE MARZO DE 1985:

Existen diversos registros de los daños provocados por el sismo del 3 de marzo de 1985, fuertemente sentido entre Valparaíso y Pichilemu, con magnitud Richter de  $M_s = 7.8$ . Según los antecedentes recopilados, el daño se concentró en los departamentos altos construidos a lo largo de Avenida San Martín (Thorson, 1999; Pérez, 1988; Saragoni, 2003, más información de prensa).

Según el inventario de daños del terremoto de 1985 (varios autores: Calcagni 1988; Monge, 1986; Pérez, 1986; Galdames y Saragoni, 2002, más información de prensa), los edificios que concentraron daño estaban ubicados entre 8 y 10 Norte, por Av. San Martín. Los más emblemáticos son los Edificios Hanga-Roa y Acapulco. Este último además ha registrado daño en los últimos 4 terremotos (1965, 1971, 1985 y 2010). La Figura 7.6 muestra los edificios con mayor nivel de daño del terremoto de 1985 según Thorson (1999), junto con el registro de lineamientos de origen desconocido obtenidos a partir del análisis de fotografías aéreas, y que en algunos casos estarían alineados en el sentido de orientación de la falla Marga-Marga (NW).

Galdames y Saragoni (2002) proponen que las edificaciones que sufrieron mayor daño en el terremoto de 1985 en Viña del Mar, estarían sobre la traza de la falla Marga-Marga, a partir de lo cual sugieren una posible activación de la falla ante eventos sísmicos. Según los autores, la presencia de la falla por debajo del Plan de Viña representa una condición de borde local y que producto de un sismo, se generarían movimientos en la falla afectando a las estructuras que estén sobre ella. La Figura 7.7 muestra la traza de la falla inferida en el trabajo de Galdames y Saragoni (2002) sustentada en el daño sufrido en los edificios y el daño reportado en el sector de Canal Beagle. Además, los autores señalan que la falla aparentemente habría sufrido un pequeño desplazamiento centimétrico producto del sismo, generando el levantamiento de tejas en el techo de casas (algunos centímetros) en el sector de 1 Norte y 5 Oriente, y que respondería a un fuerte movimiento vertical (Fotografía 7.2).



**Figura 7.6.** Lineamientos reconocidos a partir de fotografías aéreas de 1954 y 1996, más daño de edificios por terremoto 1985.  
**Fuente:** Thorson, 1999



**Fotografía 7.2.** Daños locales en techos de casas ubicadas sobre el trazado de la falla Marga-Marga (1 Norte con 5 Oriente, destacado en rojo) producto del terremoto de 1985  
**Fuente:** Galdanes y Saragoni, 2002.



Figura 7.7. Ubicación de la falla Marga-Marga según estudio de Galdames y Saragoni (2002). Fuente: Galdanes y Saragoni 2002.



Según Sabaj (2008) la falla Marga-Marga es una de las 15 estructuras reconocidas en la Cordillera de la Costa (entre los 33° y 33°45'S) consideradas de mayor potencial sismogénico. Su mecanismo no estaría determinado, sin embargo generaría zonas con alto peligro (> a 40%g) en sectores interiores (Quilpué, Villa Alemana y El Pangue). Se calculó que un sismo en esta falla podría alcanzar una magnitud de 6,8 y aceleraciones horizontales en roca de hasta 49,5%g.

#### 7.1.5 OTROS ANTECEDENTES

Según algunos autores (Calcagni, 1988 y Aguirre et al. 1986, en Thorson 1999) la concentración de daños en el Plan de Viña del Mar podría ser causada por la presencia de una antigua desembocadura del Estero Marga-Marga. Según Thorson (1999) la interpretación de este antiguo curso del estero entra en conflicto con las evidencias geológicas del entorno, donde casi toda la parte superior del Plan de Viña tiene sedimentos del antiguo estero (canales, barras, diques y flechas). Al respecto y tal como se presentó en el capítulo 5.3.5.3, en el presente estudio se realiza un modelo geológico de los primeros 30 metros bajo superficie en el Plan de Viña del Mar, modelando las distintas unidades de suelo desde el punto de vista de su origen geológico. Los resultados permiten sugerir que la desembocadura del estero Marga-Marga bajo el Plan de la Ciudad de Viña del Mar fue de tipo delta, y descartaría la existencia de un único brazo bajo la ciudad que concentraría daños.

Si bien, ninguno de los estudios recopilados explica los mecanismos que originarían una activación de la falla o amplificación sísmica ante eventos sísmicos, en Thorson (1999) se menciona la existencia de 4 posibles causas:

- (1) Guía de ondas: La zona de falla en el basamento rocoso (de baja velocidad) podría capturar, refractar y concentrar la energía sísmica de movimiento hacia el exterior (desde la zona de subducción hacia arriba), aumentando localmente la intensidad y conduciendo efectos secundarios asociados con la consolidación y deshidratación de los suelos, responsable de la formación de fisuras y lagunas.
- (2) La ruptura de la falla y un posible movimiento en profundidad podría haber contribuido a la señal sísmica, afectando la superficie a través de la ruptura de la cobertura de sedimentos.
- (3) Una tercera posibilidad de estos patrones lineales es que estén indirectamente relacionados con la profundidad de los sedimentos en la zona del valle (situación que concuerda con lo presentado por Verdugo, 1996), generándose una amplificación sísmica de movimiento.
- (4) Una cuarta posibilidad es la existencia de una o más rupturas prehistóricas y los sedimentos afectados por estas rupturas constituyan una zona reactivada en 1906 y 1985.

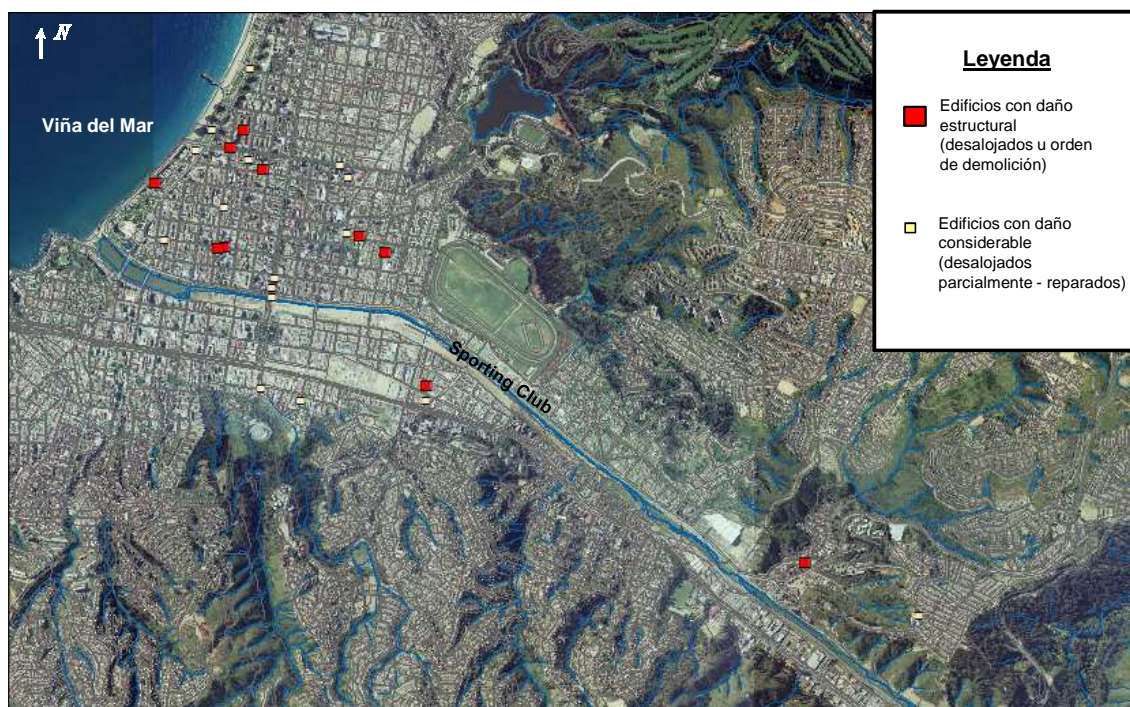
## 7.2 ANTECEDENTES APORTADOS POR ESTE TRABAJO

Se presentan un conjunto de antecedentes y nueva información que permiten por un lado confirmar la existencia de la falla Marga-Marga, sugerir una nueva traza en la zona del Plan de Viña del Mar y una zona de potencial influencia sísmica.

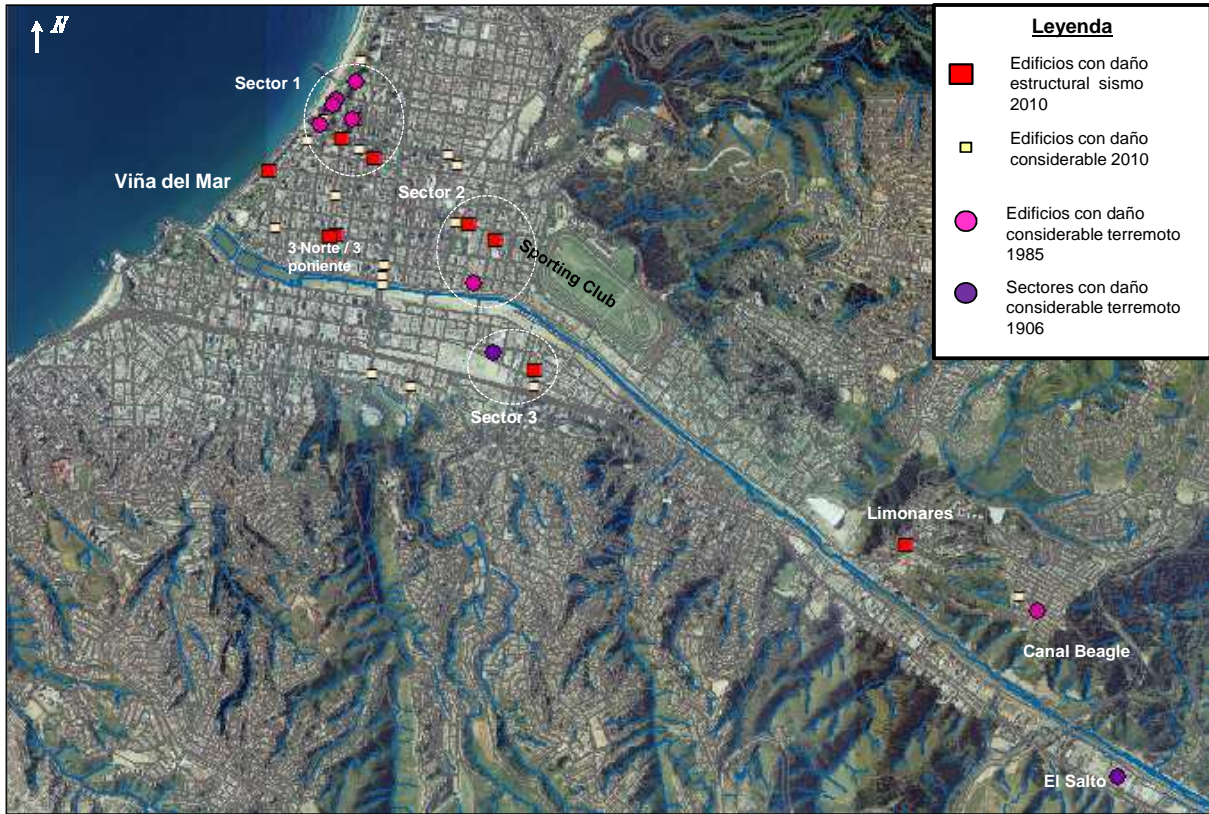
### 7.2.1 ANTECEDENTES DE DAÑOS EN EL PLAN DE VIÑA DEL MAR POR EL TERREMOTO DE FEBRERO 2010

El 27 de febrero de 2010, la región de Valparaíso se vio afectada por un sismo de gran magnitud (8.8 Mw) el cual generó daños a edificaciones, viviendas, red vial, servicios básicos y sistemas de comunicaciones, dejando un número importante de muertos, lesionados y damnificados, afectando el normal desarrollo de la región en su escenario actual y futuro. Según el inventario recopilado a partir de inspecciones de terreno, información de prensa, datos de la Dirección de Obras Municipales e información entregada por la UTFSM (Carrasco y Nuñez, 2012), parte de los daños de la ciudad de Viña del Mar, en particular las edificaciones de gran altura se concentraron en la población Vergara (Plan de Viña) y presentados en la Figura 7.9, en la que se incluyen edificios de 4 o más pisos que presentaron daño estructural, desalojo y/o orden de demolición (cuadrados grandes color rojo) y edificios con daño severo y desalojo parcial (cuadrados pequeños color damasco).

Resulta interesante la superposición del daño de los tres eventos mencionados en el estudio: 1906, 1985 y 2010 (Figura 7.10), a partir de la cual se puede interpretar la recurrencia que tienen algunos sectores: Av. San Martín, entre 7 y 9 Norte (Sector 1); Av. Los Castaños y 5 Oriente, entre 1 y 4 Norte (Sector 2); alrededores de calle Valparaíso con Limache (Sector 3); más sectores como Canal Beagle, Limonares, El Salto y 3 Norte entre 2 y 3 Poniente.



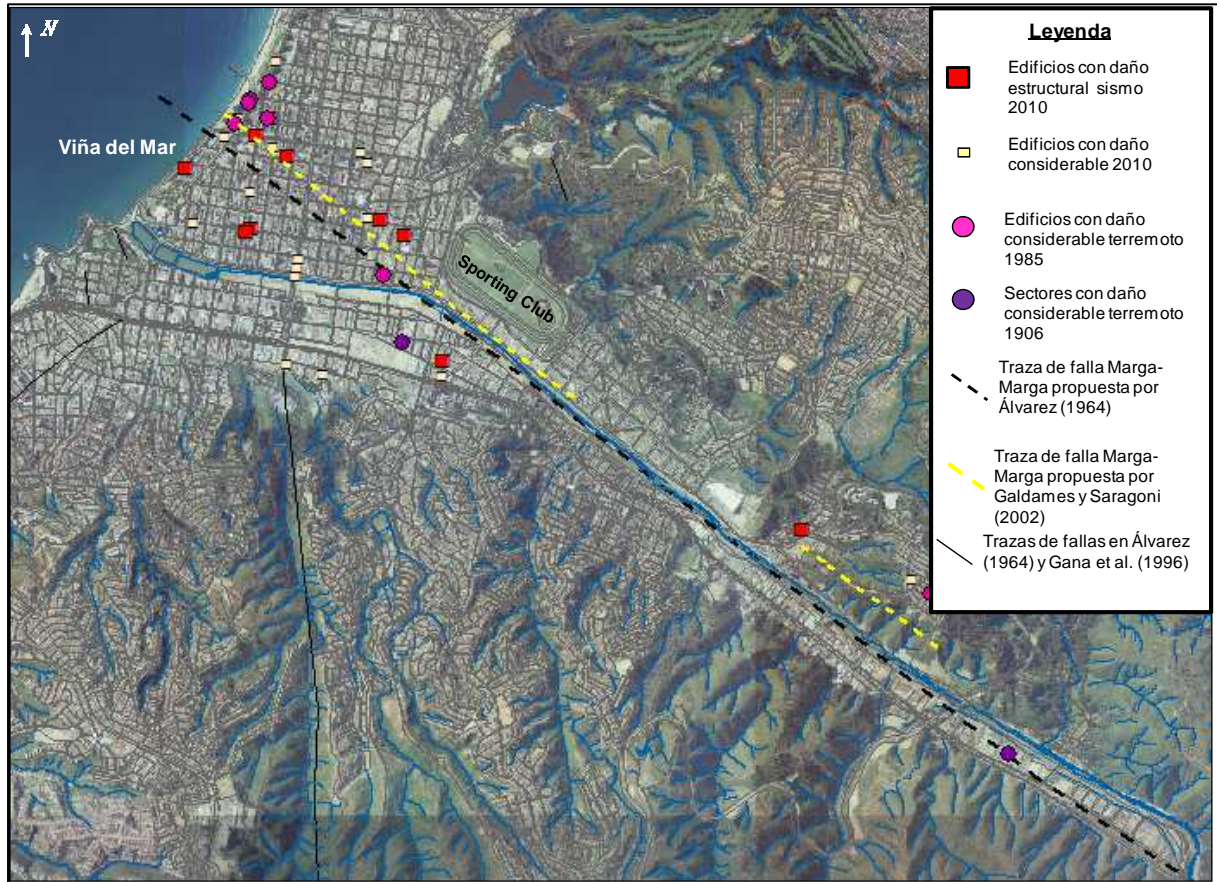
**Figura 7.9. Inventario de daños importantes producto del terremoto 2010**  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 7.10. Sectores con mayor daño en terremotos de 1906, 1985 y 2010.**  
**Fuente: Elaboración propia**

### 7.2.2 TRAZA DE LA FALLA MARGA-MARGA

A la información recientemente presentada, se incluye las trazas propuestas por autores mencionados en el presente trabajo, específicamente Álvarez (1964) y Galdames y Saragoni (2002). Ver Figura 7.11. La traza propuesta por Thorson (1999) coincide con las anteriores en términos generales. Dada la calidad gráfica de las figuras del estudio de Thorson (1999), así como el poco detalle presentado en términos de infraestructura vial del plan de Viña, no fue posible georeferenciarla.

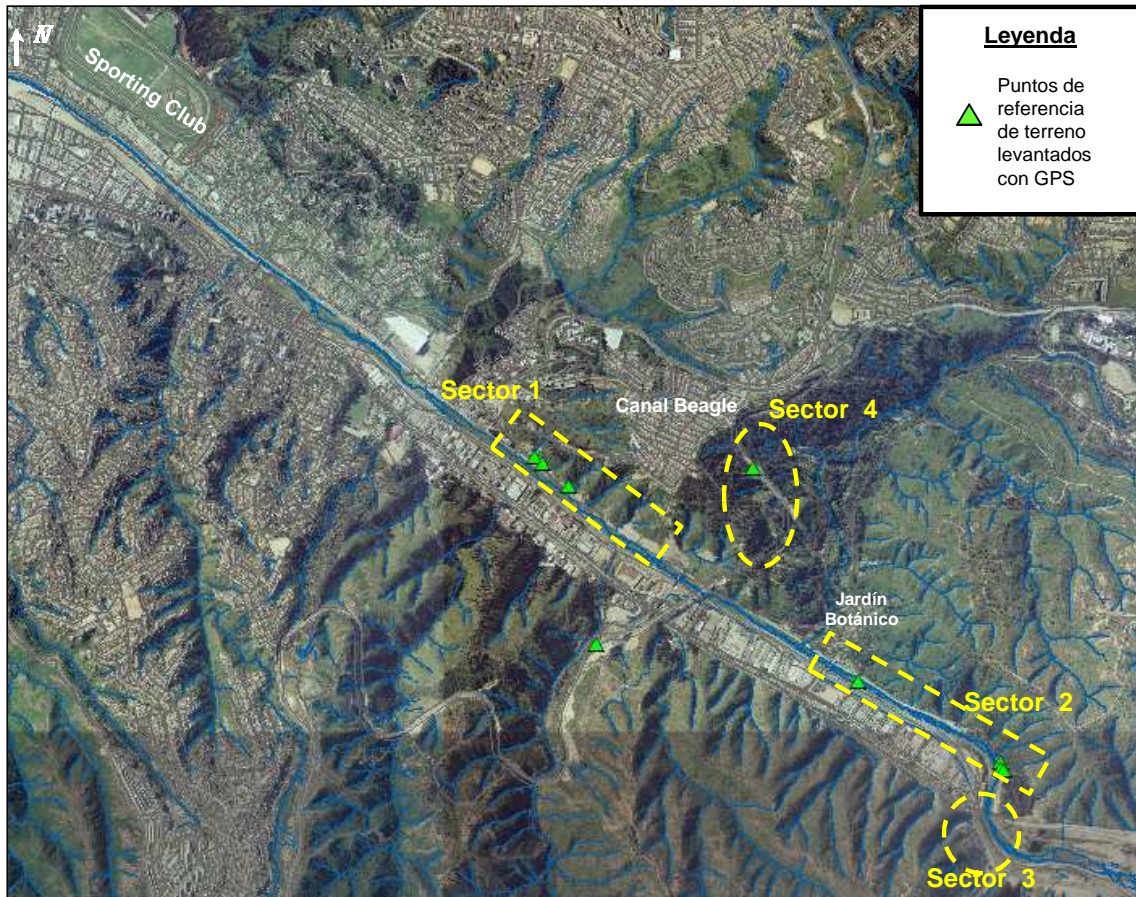


**Figura 7.11. Ubicación de trazas de falla Marga-Marga definida por Álvarez (1964) y Galdames y Saragoni (2002).**

**Fuente: Elaboración propia**

En el contexto señalado, en el presente estudio se realizaron al menos 7 visitas a terreno específicamente orientadas a validar la información propuesta por autores anteriores y a su vez redefinir la traza de la falla Marga-Marga en sectores donde existe exposición de afloramientos rocosos por el cauce del actual estero. Esta información se complementó con recorridos en la zona urbana orientados a validar el inventario de daños y buscar indicios de deformación o movimientos en la ciudad. La Figura 7.12 muestra con triángulos verdes los puntos visitados, donde se presentaron las siguientes evidencias de la presencia de zonas de debilidad, lineamientos y fallas.

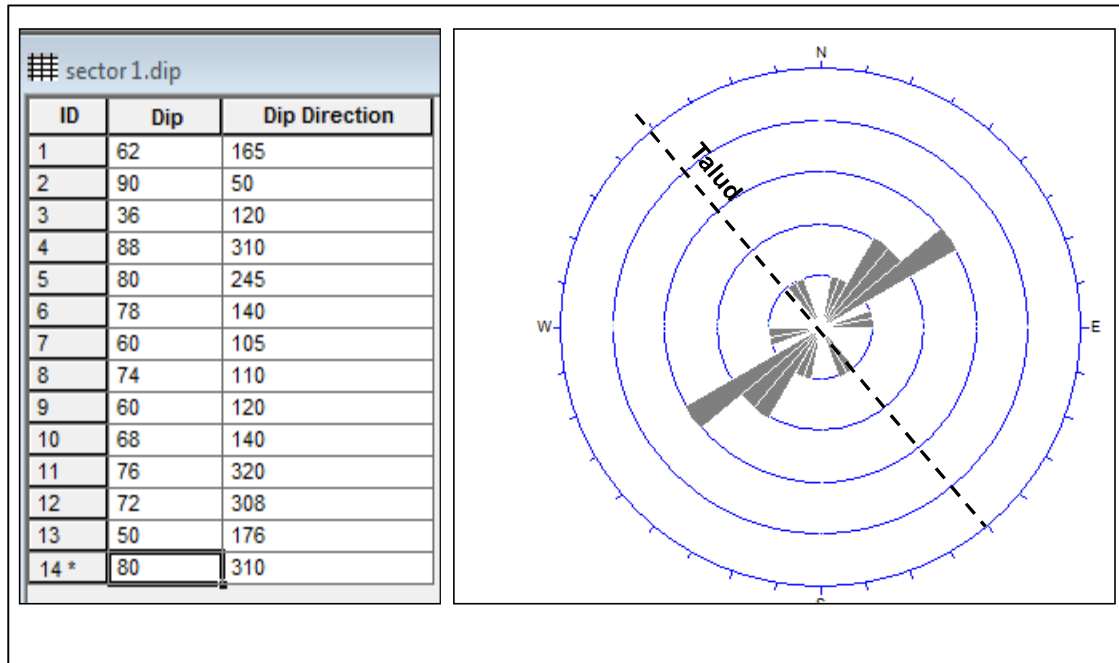




**Figura 7.12. Ubicación de sectores recorridos en terreno**  
**Fuente: Elaboración propia**

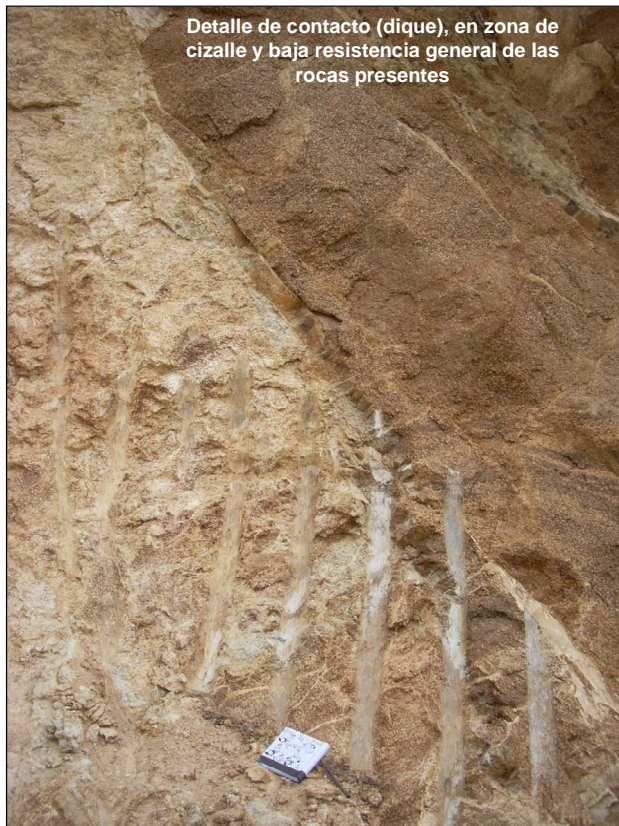
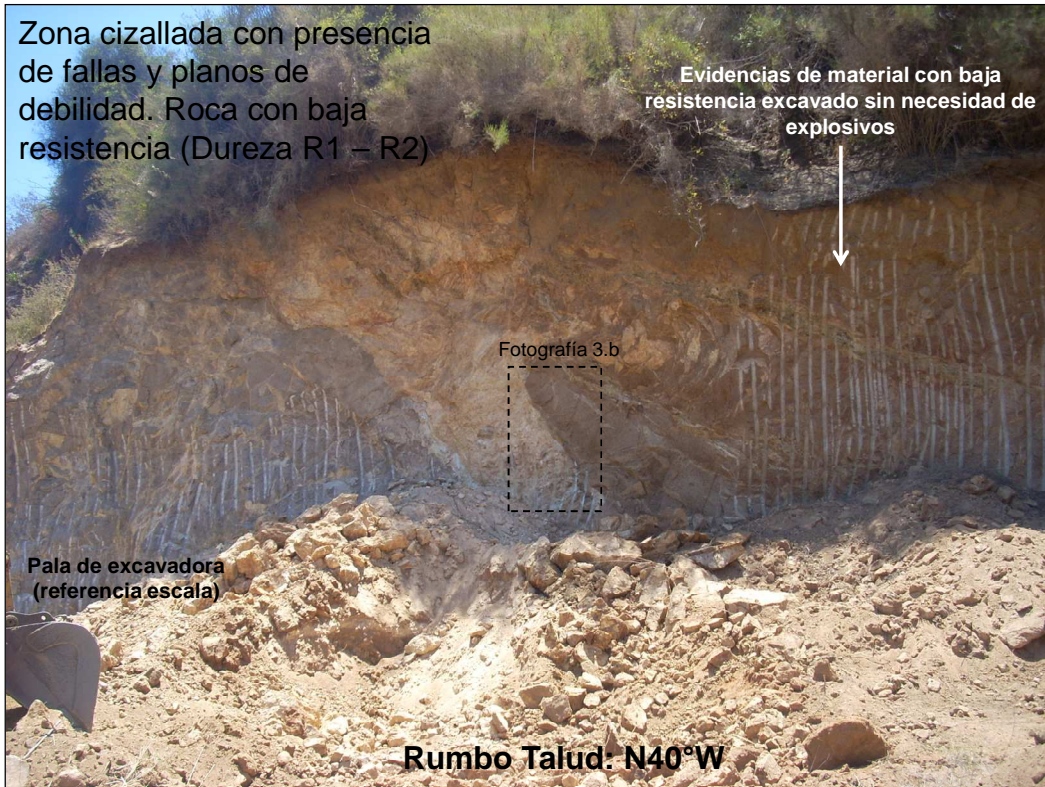
**Sector 1: Pasaje 1 Norte, costado norte de Estero Marga-Marga, bajo Canal Beagle.**

En el sector recorrido es posible reconocer una zona de intenso cizalle, con evidencias claras de presencia de fallas y estrías. Las Fotografías 7.3.a, 7.3.b, 7.4.a y 7.5.b muestran evidencias de la condición descrita. A partir de mediciones puntuales realizadas en terreno y la roseta generada a partir de los datos (Figura 7.13) es posible determinar las orientaciones preferentes reconocidas (S1: NE; S2: NW y S3: EW). Si bien la roseta muestra una orientación preferencial NE, esta condición es fácilmente explicable producto que las laderas utilizadas para la toma de datos tiene orientación NW, por lo que los planos con esta orientación son difíciles de reconocer (paralelas al talud), sin embargo, en algunos cortes con orientación NE, se reconocieron los sistemas NW (paralelos a la falla Marga-Marga)



**Figura 7.13. Roseta mostrando orientaciones preferenciales obtenidos a partir de la toma de datos puntuales en talud con orientación NW. Se reconoce S1: NE; S2: NW; S3: EW.**  
**Fuente: Obtención propia**

Además, el macizo rocoso es de tipo roca intrusiva jurásica (según Gana et al., 1996), que en general se presenta con alta dureza en la región (R5 según golpes de martillo geológico, equivalente a una resistencia a la compresión simple mayor a 100 MPa, según clasificación Brown (ISRM, 1981)). Sin embargo, en este sector, además del fuerte cizallamiento reconocido, el macizo rocoso se presenta con una dureza de R1 a R2 (débil a muy débil, asociado a resistencia a la compresión simple menor a 25 MPa), poco usual en este tipo de roca, lo que permite concluir que se está en presencia de una zona de falla e intenso cizalle, descartando meteorización a partir del reconocimiento de estrías y excavación artificial del talud sobrepasando el límite de influencia atmosférica y orgánica.



Fotografía 7.3.a y 7.3.b. Talud rumbo N40°W, mostrando zona de cizalle, con presencia de fallas y planos de debilidad. Baja resistencia de la roca (dureza estimada R1 a R2), que queda en evidencia por las marcas de remoción del material sin necesidad de explosivos. Foto 7.3.b muestra detalle fotografía 7.3.a

Fuente: Obtención propia



**Fotografía 7.4.a. Talud NW, mostrando zona de cizalle, con presencia de fallas y planos de debilidad. Baja resistencia de la roca (dureza estimada R1 a R2).  
Fuente: Obtención propia**



**Fotografía 7.4.b. Detalle de falla mostrando estrías con dirección 46°S y evidencias de movimiento de tipo sinistral inverso.  
Fuente: Obtención propia**

### Sector 2 y 3: Estero Marga-Marga sector El Salto y Cantera.

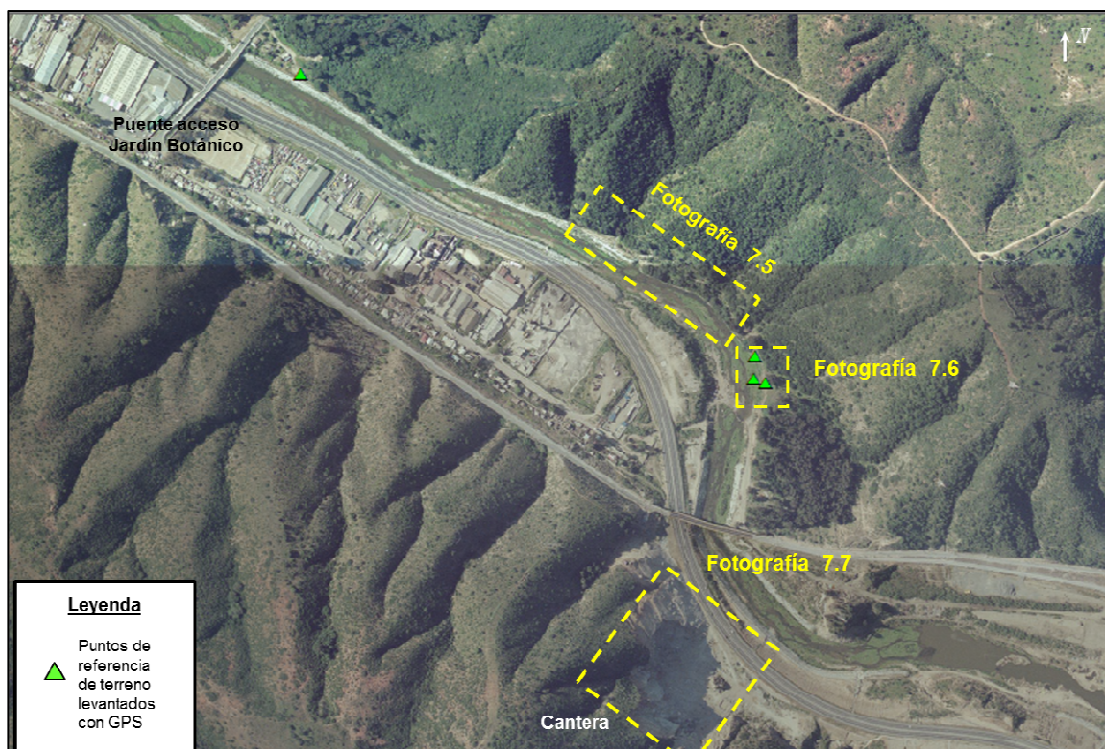
El sector 2 corresponde al costado norte del estero Marga-Marga, entre el puente de acceso al Jardín Botánico y el puente ferroviario (Puente Marga-Marga) que atraviesa el Estero desde El Salto en dirección a Quilpué (Ver Figura 7.14).

Si bien ladera norte que bordea el estero presenta una intensa cubierta vegetal, fue posible reconocer en términos morfológicos una dirección preferente natural de las laderas paralela a la traza reconocida e interpretada de la falla Marga-Marga (Ver Fotografía 7.5).

Como complemento a la información presentada, en la punta sur del sector 2, específicamente en las laderas naturales que actualmente encausan el estero producto de terrazas fluviales, se reconocen planos que controlan el talud en afloramientos rocosos justo donde el estero cambia de dirección de NW a NS (Ver Fotografía 7.6).

Finalmente, el sector 3 corresponde a una vista frontal de “La Cantera”, ubicada en la ladera sur del estero inmediatamente al sur del puente ferroviario. Mediante observación a distancia y visamiento de las estructuras que controlan la ladera (Ver Fotografía 7.7).

El sector 4 indicado en Figura 7.12, se visita para validar la información presentada por Thorson (1999) en términos de la posible actividad reciente de la falla, y cuyos resultados se presentan más adelante.

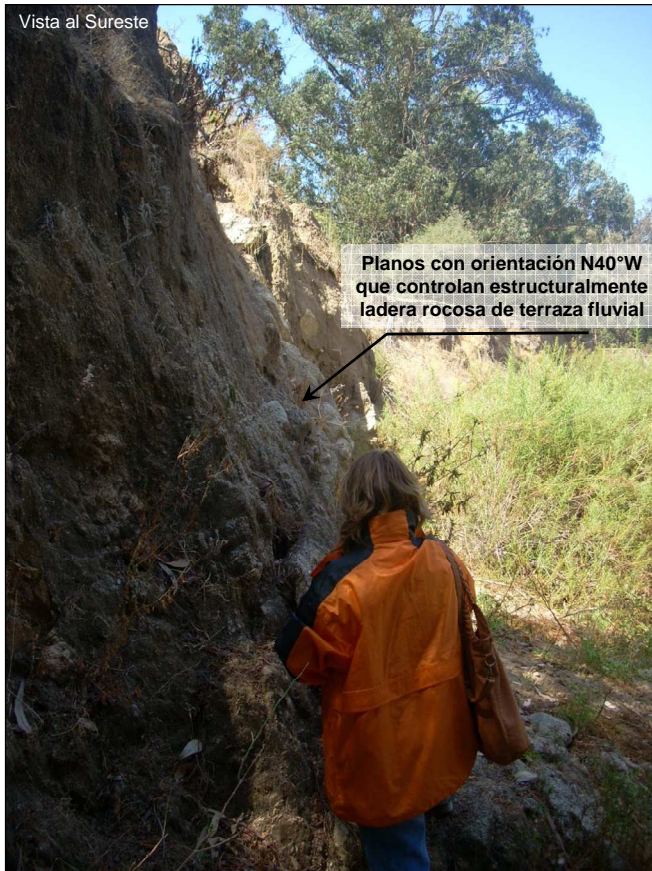


**Figura 7.14. Ubicación de sector 2 recorrido en terreno, mostrando la ubicación de las Fotografías 7.5, 7.6 y 7.7**

**Fuente: Elaboración propia**

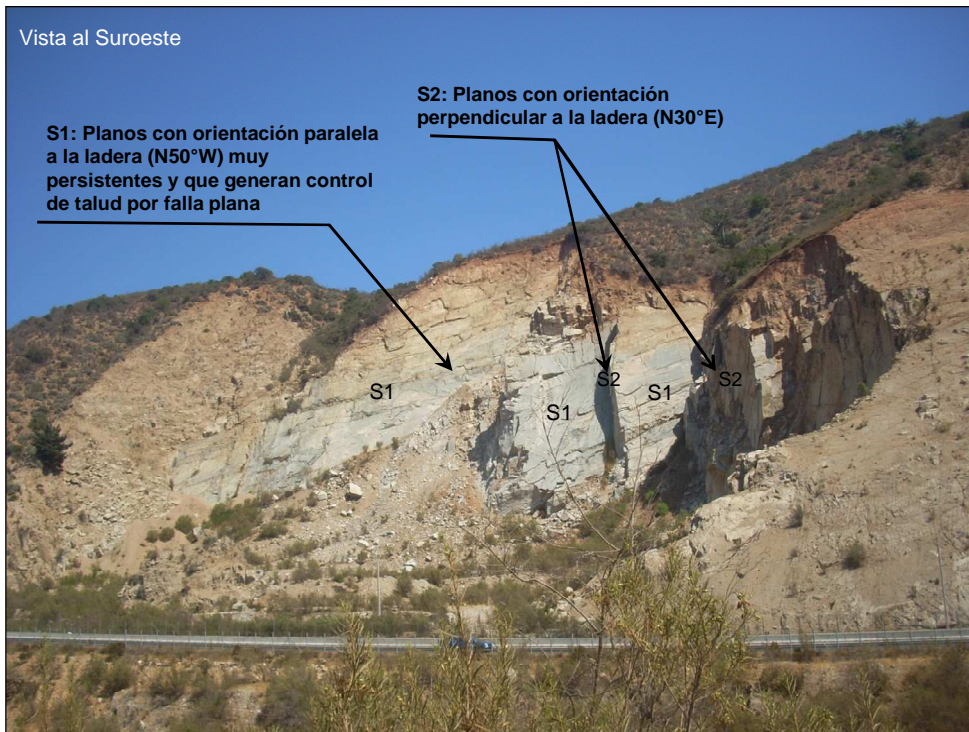


**Fotografía 7.5. Vista mirando al Noroeste tomada desde el inicio de la curva de estero Margamarga (Norte de puente ferroviario), mostrando la orientación natural de las laderas (NW)**  
Fuente: Obtención propia



**Fotografía 7.6.** Vista mirando al Sureste, tomada desde en el cambio de rumbo del estero (de NW a NS) mostrando el control estructural que tienen las laderas de terrazas fluviales (rumbo N40°W)

Fuente: Obtención propia



**Fotografía 7.7.** Vista mirando al Suroeste, tomada hacia ladera sur de estero, frente a puente ferrocarril. Se evidencia fuerte control estructural que tienen las laderas de terrazas por planos N50°W (S1) y sistema perpendicular N30°E (S2).  
Fuente: Obtención propia

### 7.2.3 DATOS GEODÉSICOS PLAN DE VIÑA DEL MAR

La oficina de catastro de la Dirección de Obras Municipales (DOM) de la Municipalidad de Viña del Mar, encargada de realizar un catastro digital de la faja de bienes de uso público, posee una cartografía de alta calidad de la ciudad (en el sector de Viña del Mar se estima con errores de 20 centímetros). Con la información recopilada pre y post terremoto 2010, la oficina de catastro preparó un documento facilitado para el presente estudio donde se visualizaron las modificaciones que puede haber sufrido la topografía comunal (Romero et al., 2010)

Los datos presentados en la Figura 7.15 muestran la ubicación de los puntos de control en el Plan de Viña y una tabla que compara mediciones realizadas durante el año 2007 y mediciones post terremoto. El criterio de selección de los puntos de medición se definieron donde los efectos del terremoto se manifestaron de manera más destructiva para las edificaciones. Para esto se incluye información de edificaciones con daños ingresadas en Inspección de la Dirección de Obras.

La Figura 7.15 muestra en verde los puntos con una menor diferencia (3cm), en marrón aparecen puntos con diferencias menores que 3,5 cm y en color rojo aparecen los puntos que tienen diferencias entre 4,3 y 4,7cm. En términos generales, se puede observar que las deformaciones se concentran en el entorno a la traza de la falla definida por autores anteriores y daños observados en el 2010. Además, se observan diferencias mayores en el entorno directo de la actual desembocadura del estero (rivera artificial) donde además se presentan con frecuencia socavones y en ocasiones desprendimiento del material menos compactado.

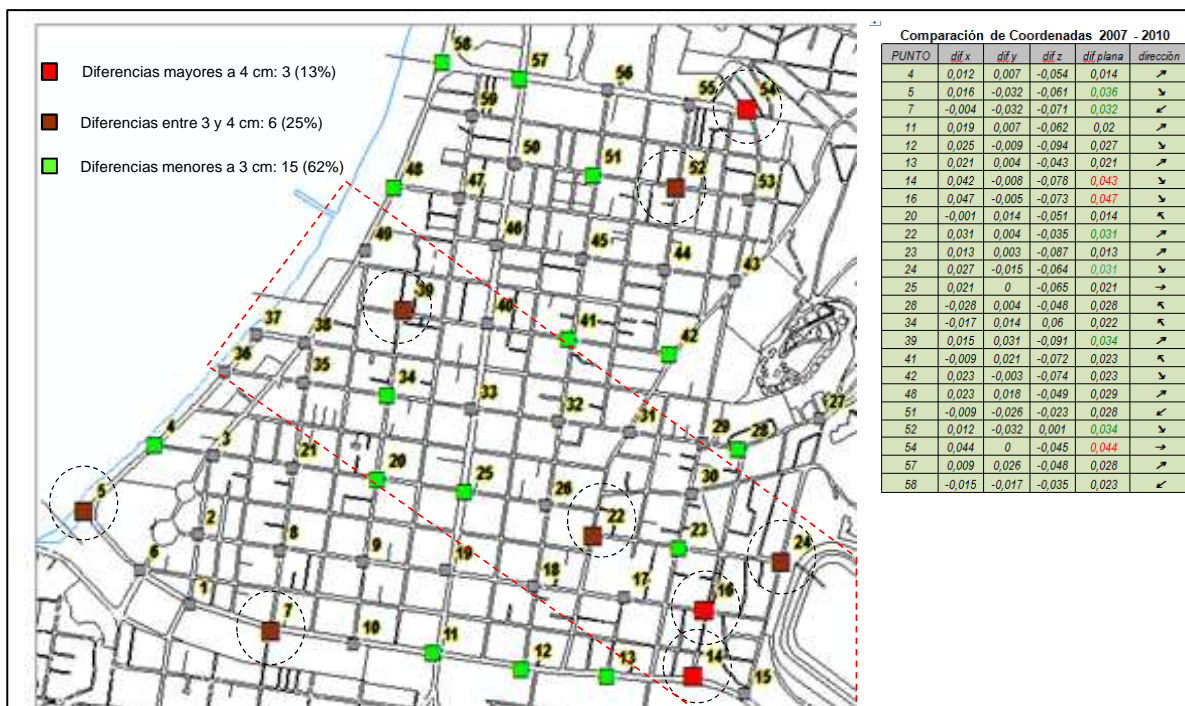


Figura 7.15. Ubicación de estaciones catastradas pre y post terremoto mostrando las diferencias mayores registradas en las mediciones.

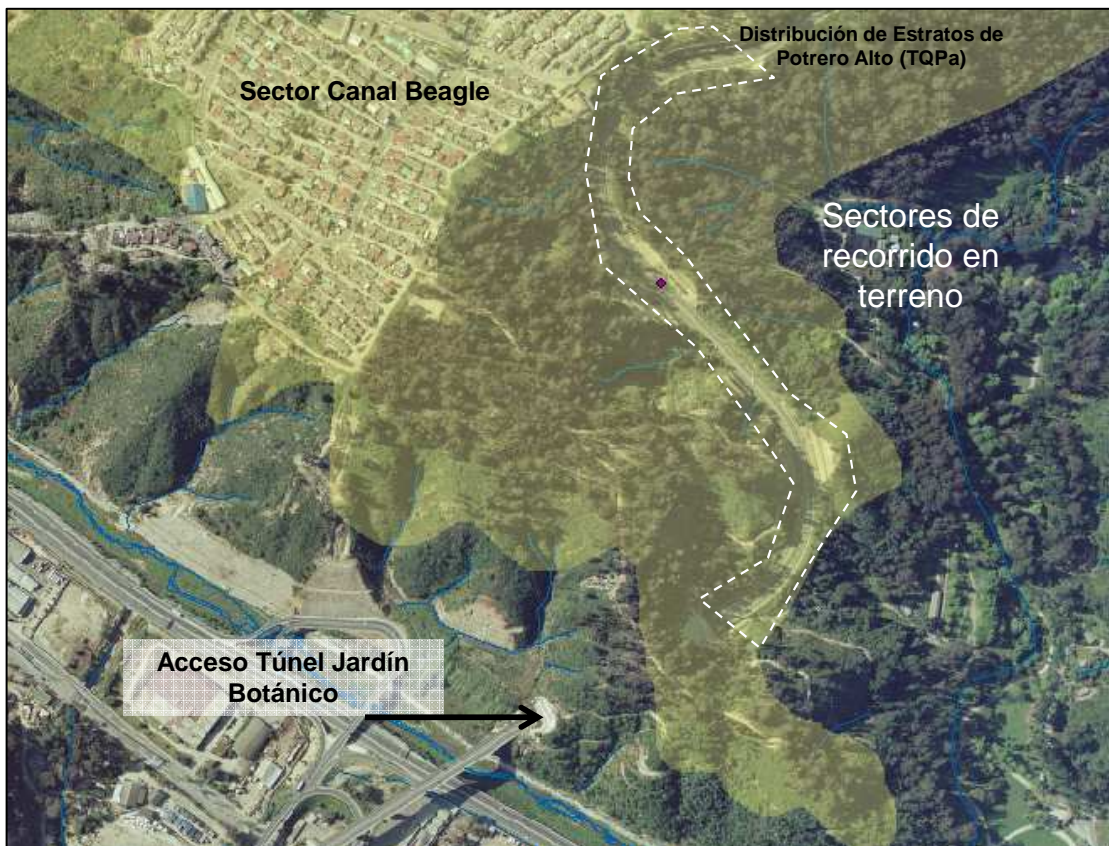
Fuente: Modificada de Romero et al., 2010 (Informe inédito)



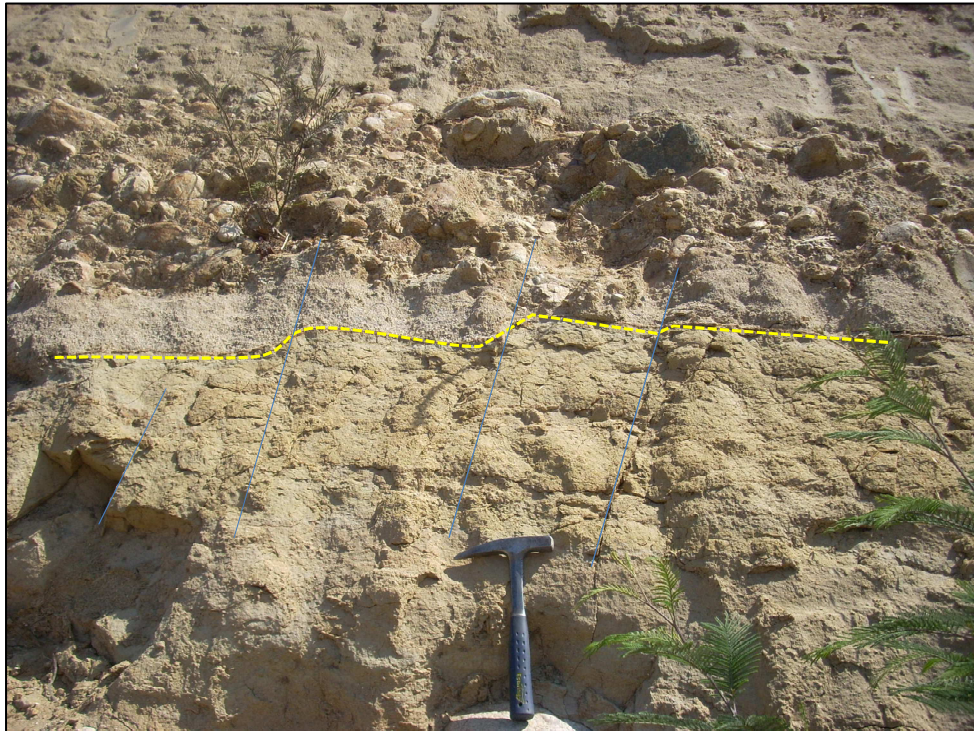
#### 7.2.4. EVIDENCIAS DE ACTIVIDAD RECIENTE

Como se mencionó anteriormente, las evidencias de posible actividad cuaternaria de la falla Marga-Marga fueron descritas por Álvarez (1964) en términos de perturbación y deformación de sedimentos estuariales reconocidos en la zona (Qe según Álvarez (1964) y Estratos de Potrero Alto (TQPa) según Gana et al. (1996)). Así mismo, Thorson (1999) en su estudio reconoce evidencias de deformación y movimiento de fallas inversas ciegas por la transferencia de desplazamiento de una falla a otra.

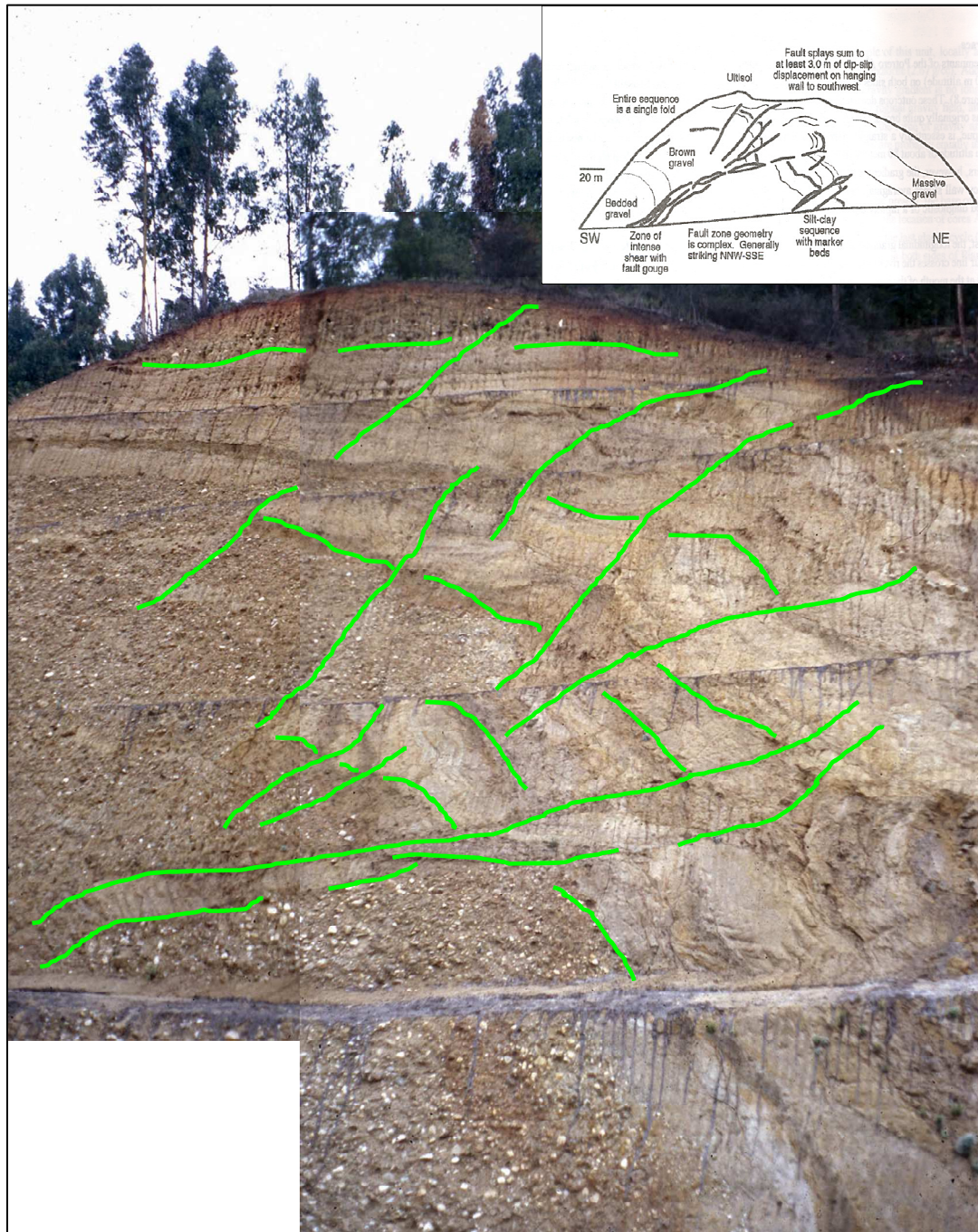
En el presente estudio se realiza una visita a terreno orientada a validar y reconocer la deformación descrita por Thorson (1999) en los sectores indicados en la Figura 7.16. En las Fotografías 7.8 y 7.9 se muestran algunos indicios de movimiento y desplazamiento en la base de la formación Estratos de Potrero Alto que concuerdan con las observaciones de los autores mencionados (fallas inversas). La Fotografía 7.10 muestra una comparación entre las observaciones realizadas por Thorson (1999) y las evidencias en terreno. Sin embargo, en la actualidad no se visualiza que la deformación haya afectado la cubierta de suelos cuaternarios.



**Figura 7.16.** Ubicación de área recorrida en terreno Formación TQPa, entre Canal Beagle y Túnel del Jardín Botánico  
**Fuente:** Elaboración propia



Fotografías 7.8 y 7.9. Unidad Estratos de Potrero Alto (TQpa) mostrando evidencias de deformación  
Fuente: Obtención propia



**Fotografía 7.10. Unidad Estratos de Potrero Alto (TQpa) mostrando evidencias de deformación**  
**Fuente: Modificada de fotografías tomadas por Thorson (1999) facilitadas para este estudio**

### 7.3 TRAZA(S) DE FALLA MARGA-MARGA DEFINIDA POR ESTE TRABAJO

A partir de la información presentada, se define una nueva traza principal de la falla Marga-Marga bajo el plan de la ciudad de Viña del Mar (Figura 7.17) basándose en antecedentes de daños ocasionados por el terremoto del 27 febrero 2010, antecedentes de terreno e información de deformación en la Población Vergara (Muñoz et al., 2012)

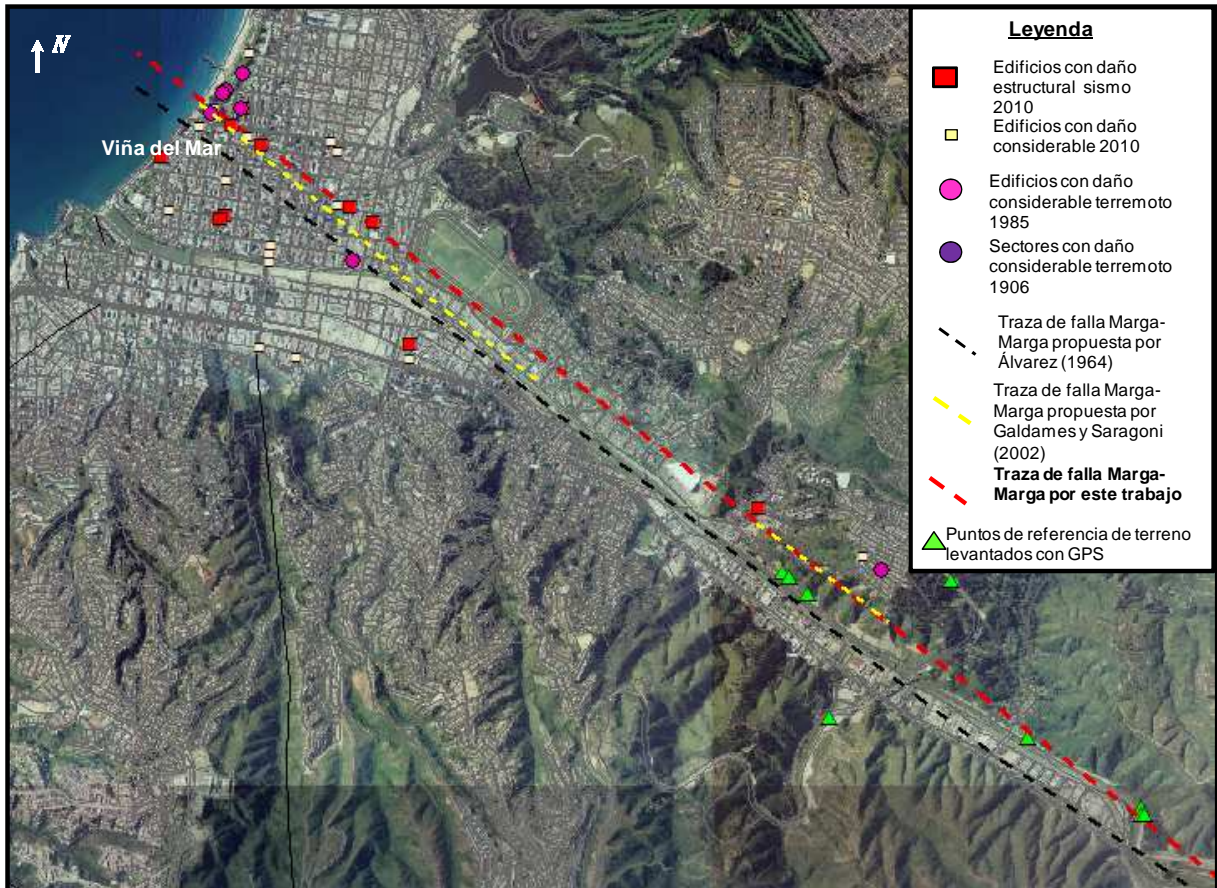
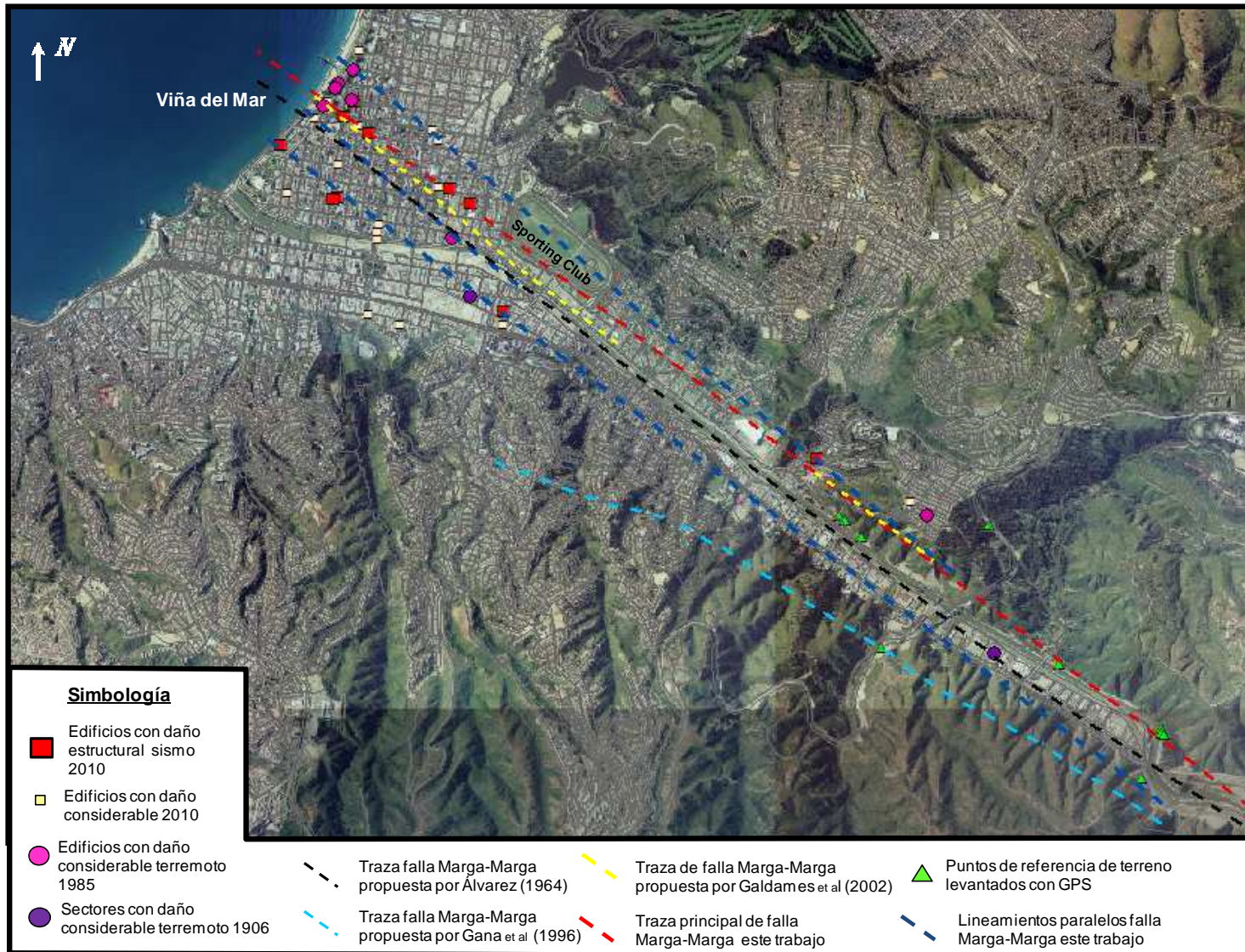


Figura 7.17. Trazas de falla Marga-Marga propuestas por este trabajo (línea segmentada color rojo)  
Fuente: Elaboración propia

A partir de daños al norte y al sur de la traza definida y las estructuras identificadas en terreno, se proyectan además 3 lineamientos de la falla Marga-Marga (uno al norte y dos al sur) paralelos a la traza principal definida (mostrados en la Figura 7.18), uniendo los daños con los datos de terreno. Lo anterior permite sugerir la presencia de una “zona de falla” acotada al norte y al sur por los lineamientos reconocidos.



**Figura 7.18. Ubicación de las trazas de la falla Marga-Marga propuesta por este trabajo (lineamientos norte y sur)**  
**Fuente: Muñoz et al. (2012)**

#### 7.4 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA EVALUAR SUSCEPTIBILIDAD DE RESPUESTA SÍSMICA POR FALLAS MAYORES

Utilizando como base los antecedentes resumidos anteriormente, se aplica la metodología generada en el presente trabajo (descrita en el Capítulo 4) orientada a evaluar susceptibilidad de respuesta sísmica en el área urbana de la Ciudad de Viña del Mar por la presencia de la falla Marga-Marga.

En una primera etapa, la zona de estudio se subdivide en 21 unidades de análisis (de 100 metros de ancho cada una) subparalelas a la traza principal de la falla Marga-Marga definida por este trabajo, abarcando la zona plana de la ciudad y el entorno al estero. El límite en el sentido longitudinal de las unidades está dado en el oeste por el océano, y hacia el sureste con el límite de la comuna. La Figura 7.19 muestra las unidades definidas en el área de estudio.

En una segunda etapa, se aplica la Tabla 4.2 del presente estudio, evaluando los distintos ponderadores incluidos en la metodología para cada unidad a partir de la información recopilada para la zona de estudio: evidencias y registro de daño por sismos; evidencias geológicas y geomorfológicas de terreno de la existencia y actividad reciente de la falla; distancia de cada unidad a la traza principal de la falla (definida por este trabajo), considerando además a los lineamientos paralelos definidos como trazas adicionales de la falla; antecedentes sísmicos y publicaciones anteriores y antecedentes de deformación en superficie. El detalle mostrando los ponderadores para cada unidad de análisis se presenta en el Anexo L.

La Tabla 7.1 resume los valores de susceptibilidad de respuesta sísmica por la falla Marga-Marga para cada unidad, a partir de los cuales se realiza una clasificación de los valores en 4 rangos: muy alta susceptibilidad (valores de 75 a 100), alta susceptibilidad (valores entre 50 y 74), susceptibilidad media (entre 25 y 49) y baja susceptibilidad (valores menores a 25).

La Figura 7.20 muestra de manera gráfica los resultados obtenidos, a partir de los cuales se puede concluir la existencia de 7 unidades que tienen susceptibilidad mayor a 75 (muy alta), definiendo una franja central mostrada en la Figura 7.20 (color rojo) y donde se concentraría por un lado las trazas definidas y el mayor daño registrado por eventos sísmicos. Se reconocen además 2 unidades con susceptibilidad entre 50 y 75 (alta), una a cada lado de la franja de muy alta susceptibilidad y que se muestran de color anaranjado en Figura 7.20. A continuación, se reconocen 3 unidades con susceptibilidad entre 25 y 49 (considerada como media, representada de color amarillo en Figura 7.20) y siguiendo hacia zonas más distales del área definida, se reconocen 9 unidades con índices de susceptibilidad menor a 25 (baja) mostrados de color verde en Figura 7.20.

A partir de lo anterior, se podría sugerir que existe una zona con muy alta susceptibilidad de sufrir una respuesta sísmica distinta por la existencia de la falla Marga-Marga en Viña del Mar, entendida como zonas sensibles a presentar deformaciones, rupturas superficiales o una mayor intensidad ante sismos.

Esta evaluación preliminar permite por un lado dar cumplimiento a la Ley vigente en Chile (O.G.U.C, artículo 2.1.17) y reafirma la importancia de realizar estudios más profundos de la falla (peligro sísmico, estudios estructurales, entre otros). En el Anexo M se presenta en mapa de susceptibilidad de respuesta sísmica por la presenta de la falla Marga-Marga en Viña del Mar.

**Tabla 7.1.**  
**Índice de Susceptibilidad de respuesta sísmica para unidades analizadas en Viña del Mar**

<b>UNIDAD</b>	<b>IS DE RESPUESTA SÍSMICA - VIÑA DEL MAR</b>
0	14
1	18
2	30
3	65
4	77
5	77
6	83
7	78
8	83
9	79
10	83
11	69
12	30
13	33
14	14
15	14
16	14
17	14
18	14
19	14
20	14

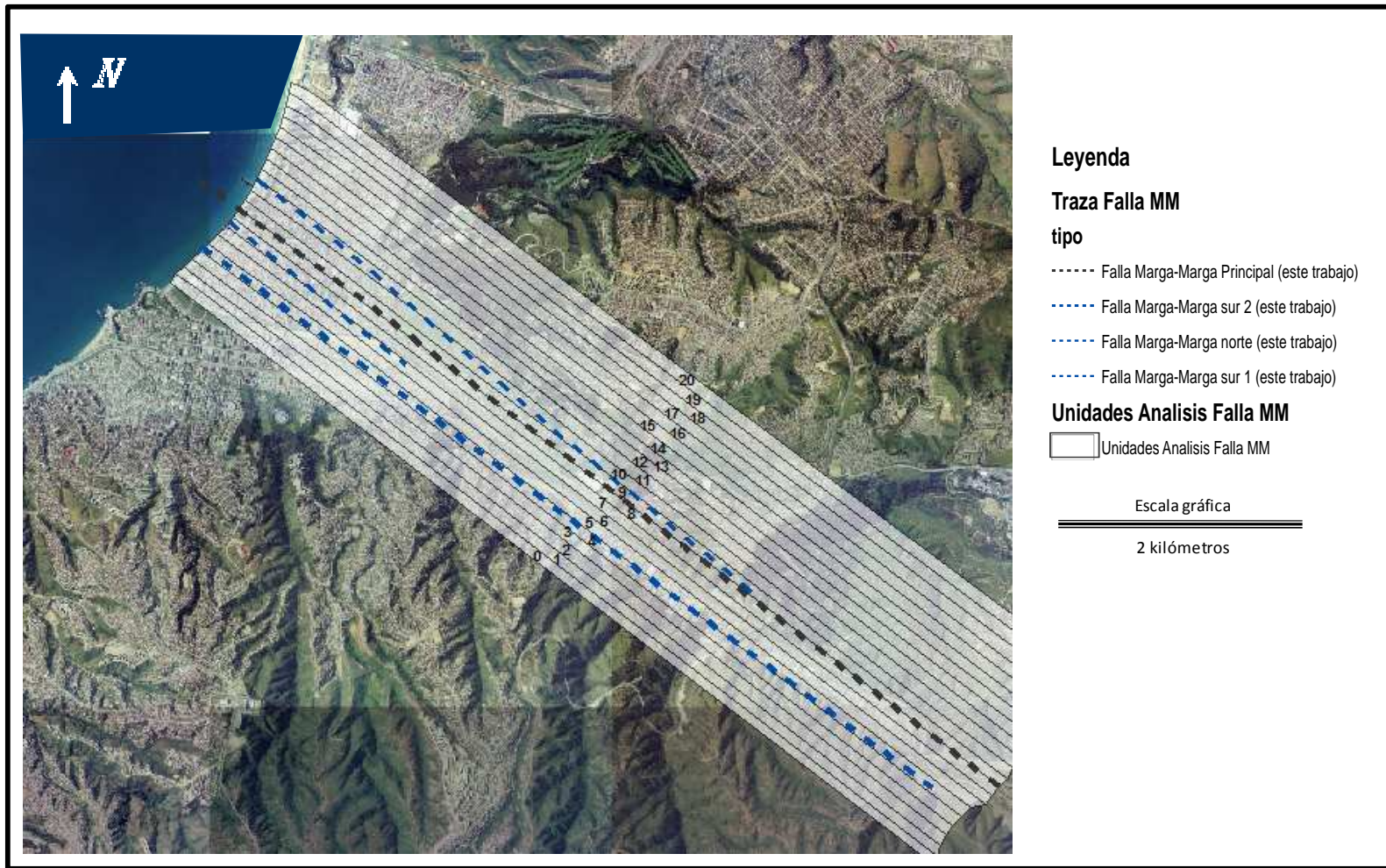


Figura 7.19. Unidades de análisis para susceptibilidad de respuesta sísmica por falla Marga-Marga en Viña del Mar  
Fuente: Elaboración propia



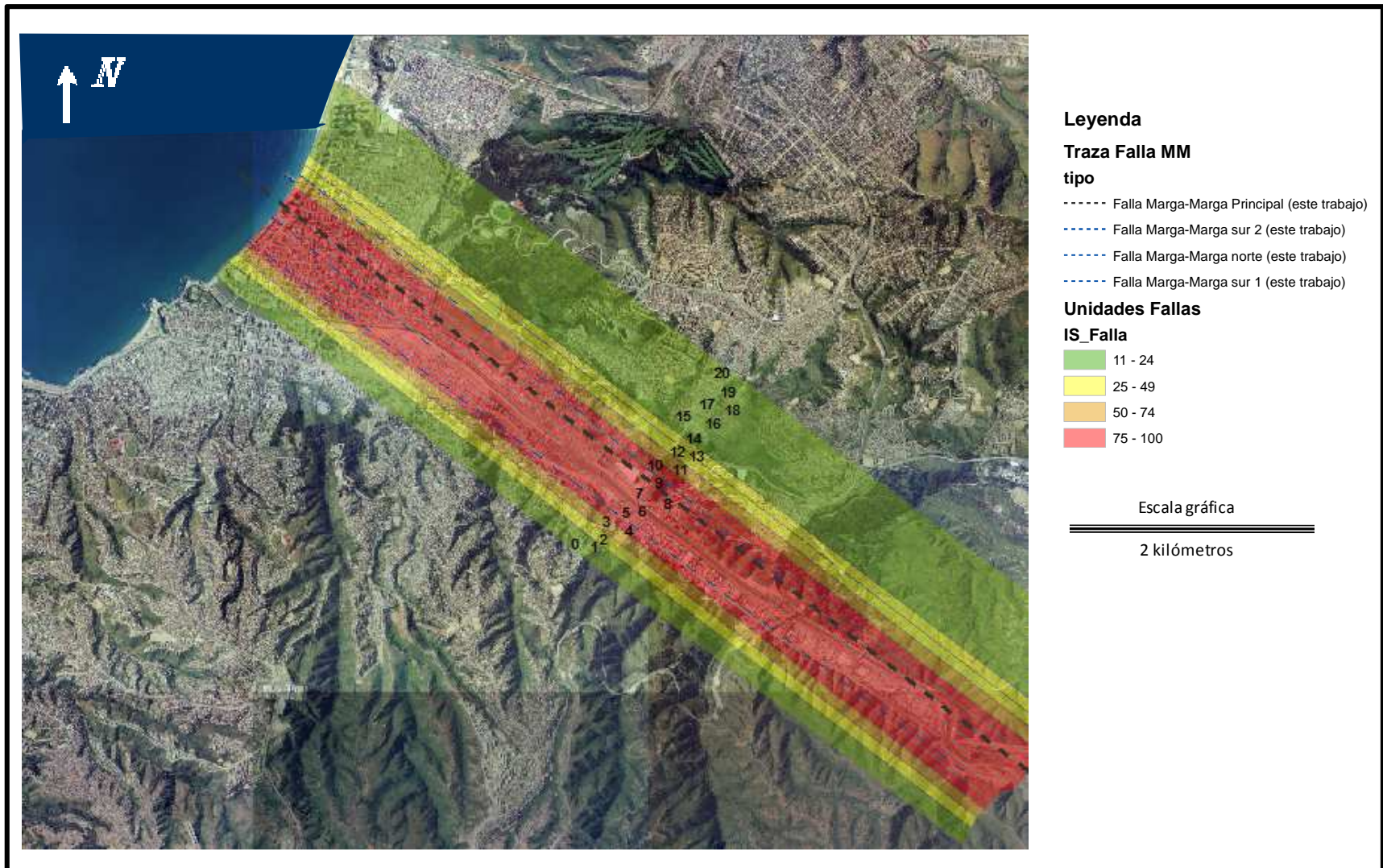


Figura 7.20. Susceptibilidad de respuesta sísmica por falla Marga-Marga – Viña del Mar  
 Fuente: Elaboración propia

## CAPÍTULO 8. DISCUSIÓN

Las metodologías propuestas en el presente estudio fueron concebidas para estimar “susceptibilidad”, entendida como la posibilidad de ocurrencia de eventos tanto de remociones en masa en áreas urbanas, o como una posible respuesta sísmica por fallas mayores. Por lo tanto, su uso, aplicación y resultados no deben reemplazar estudios en los que se requieran valores numéricos de probabilidad de ocurrencia, estudios de ingeniería de detalle de una obra, microzonificación sísmica o estudios de peligro sísmico asociados a una falla.

No obstante lo anterior, ambas metodologías permiten dar cumplimiento a las actuales leyes vigentes en Chile en términos de la definición de áreas que pueden verse afectadas por amenazas naturales (Ordenanza General de Urbanismo y Construcción, artículo 2.1.17), especialmente en lo referido a zonas con posibilidad de verse afectadas por “fallas geológicas”. Al no estar especificado en la legislación la forma en que las fallas deben ser incluidas como posibles zonas de amenaza, ni tampoco existiendo metodologías claras que indiquen cómo incorporarlas, generalmente no se consideran en los estudios de planificación territorial.

A partir de los resultados de este trabajo, el uso y la aplicación de la metodología, junto con dar respuesta a la ley, permite definir la susceptibilidad de respuesta sísmica que tendrá una zona urbana por la presencia de una falla, y por otro lado, visualizar el requerimiento de estudios más profundos de la estructura.

En la metodología propuesta para evaluar susceptibilidad de remociones en masa, también se incorporan las fallas geológicas como un factor condicionante de cada tipo de remoción, lo que hace una diferencia con metodologías existentes a la fecha.

Si bien las metodologías propuestas se diseñaron para ser usadas en cualquier sector perteneciente a un área urbana, es importante ajustar los ponderadores en aquellos casos que presenten condiciones geológicas, geomorfológicas, climáticas y urbanas particulares, pudiendo incluso ser necesario generar nuevas tablas que permitan ampliar el número de amenazas consideradas.

Particularmente en el caso de las remociones en masa, la aplicación directa de la metodología propuesta por Lara (2007) en áreas urbanas (caso de aplicación), presenta una serie de falencias que finalmente llevan a la generación de una nueva metodología ajustada. Las diferencias fundamentales entre ambas se basan por un lado en la escala de trabajo, la definición de unidades y el uso que tiene cada una. En términos de la escala de trabajo, la metodología original (Lara, 2007) propone trabajar a una escala entre 1:20.000 y 1:50.000, en sectores morfológicamente de tipo cuenca hidrográficas de decenas de kilómetros, condición que no siempre es representativa de áreas urbanas en Chile. Por otro lado, los resultados esperados requieren de un mayor nivel de detalle, incluyendo zonas sensibles a la ocurrencia de remociones a menor escala con un alto impacto en la dinámica urbana. Se puede observar que pese a la existencia de estudios de riesgo y planificación territorial en distintas comunas de Chile, en algunas ocasiones la escala de trabajo resulta insuficiente para identificar estos eventos a menor escala que finalmente ocurren, en algunos casos con un alto costo social.

Lo anterior se traduce como una escala de trabajo entre 1:5.000 y 1:10.000 propuesta en el presente trabajo, no sobrepasando las 150 unidades de análisis en el caso de las remociones en masa, pudiendo aplicarse en comunas pequeñas, entornos urbanos o sectores puntuales de grandes ciudades.

La aplicación de la metodología propuesta para remociones en masa, puede ser considerada como una etapa preliminar a un estudio de estabilidad típico, o bien, utilizarse como un complemento a la metodología propuesta por Lara (2007). En el primer caso, generalmente un estudio de estabilidad típico va asociado a una zonificación geológica-geotécnica preliminar, que permite al experto visualizar los mecanismos de inestabilidad y nivel de sensibilidad que presenta la ladera. La aplicación de la metodología propuesta permite justificar y orientar el análisis numérico en aquellas laderas de mayor sensibilidad, optimizando así los tiempos de análisis y respuesta. En el segundo aspecto, en zonas urbanas que mezclan terrenos en pendientes, zonas de quebradas, con terrenos planos (como por ejemplo, las ciudades de Valparaíso, Viña del Mar, Quilpué, Talcahuano, entre otras) resultaría útil e interesante combinar el uso de ambas metodologías.

Como etapas posteriores a la obtención de la susceptibilidad de remociones en masa, se sugiere en este estudio (al igual que la metodología propuesta por Lara, 2007) analizar las unidades con  $IS > 50$  (alta a muy alta), mediante la estimación del peligro de remociones en masa, determinación de la probabilidad de falla o entregando factores de seguridad según sea el caso.

Es importante destacar la importancia que se le da en el presente trabajo a las obras antrópicas. En el caso de áreas urbanas, las construcciones en laderas en algunos casos están asociadas a robustas obras de ingeniería que reducen o anulan la susceptibilidad de remociones en masa, mientras que en otros casos la intervención no planificada juega un rol clave en la ocurrencia de eventos, especialmente en aquellos sectores urbanos de menores recursos o donde las regulaciones de construcción no están presentes. En este aspecto, el uso de la metodología propuesta sería útil en aquellos sectores urbanos donde no se cuentan con los recursos para realizar un estudio de estabilidad sistemático de toda el área.

De la metodología propuesta, se debe tener en cuenta que algunos condicionantes pueden presentar variaciones estacionales (por ejemplo el clima, humedad y vegetación). En estos casos, se sugiere que la evaluación sea en el escenario más desfavorable en cada tipo de remoción. De la misma forma, en el caso de unidades que presenten una materialidad mixta a lo largo de la ladera, se sugiere analizar todos los posibles tipos de remociones que se puedan generar en su condición más desfavorable (altura, forma, pendiente).

Es importante recordar que las tablas propuestas están orientadas a evaluar susceptibilidad de generación de remociones en masa, no incluyendo el alcance que estas puedan tener. Se recomienda que este parámetro sea evaluado en una etapa posterior de análisis.

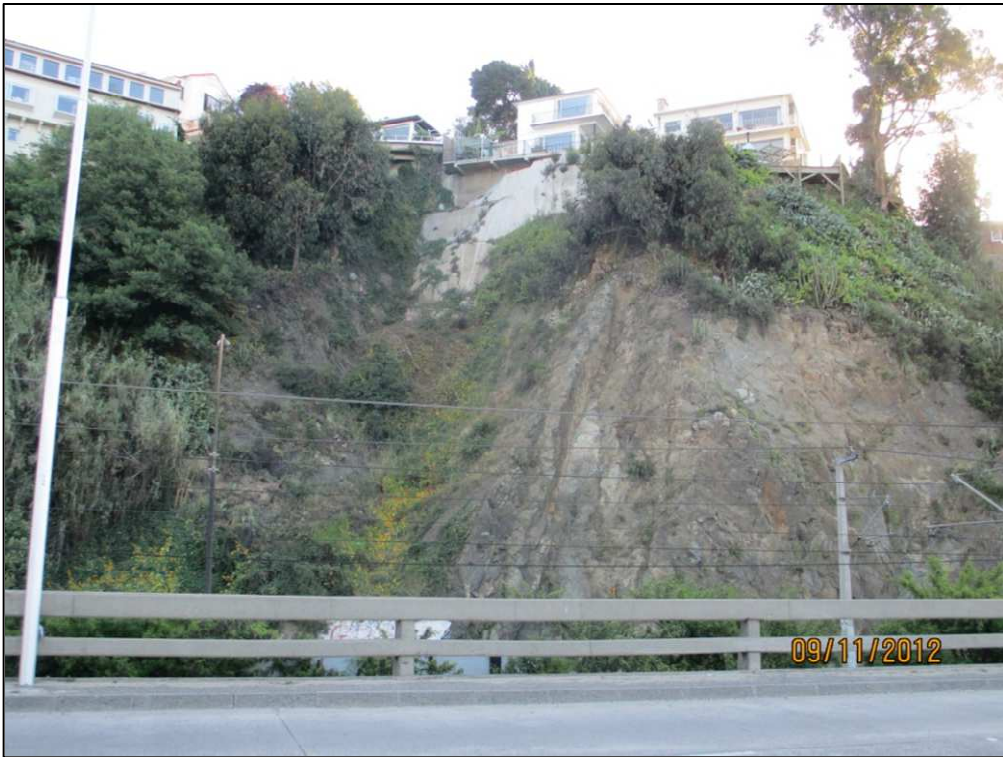
La dinámica que presentan las laderas en zonas urbanas, con fuertes variaciones en pocos metros y en poco tiempo, validan su aplicación en sectores discretos dentro de áreas urbanas. Las unidades de cada sector deben ser definidas a partir de criterios geomorfológicos, geológicos-geotécnicos y urbanos, incluyendo como límites obras antrópicas, ejes viales importantes, y excluyendo zonas de acceso restringido.

En el caso particular de Viña del Mar, los sectores de análisis escogidos para aplicar y validar la metodología se basan por un lado en criterios urbanos, incluyendo zonas de alto tránsito y de conectividad importante dentro de la región, donde cualquier evento que impida su normal funcionamiento genera un alto impacto económico y social (por ejemplo, Avenida España en el sector Recreo, Avenida La Marina en el sector Cerro Castillo, Avenida Jorge Montt entre Viña del Mar y Reñaca, y Camino Troncal en Canal Beagle). Por otro lado se intenta incluir en el caso de estudio, unidades que tengan la mayor representatividad de las unidades geológicas – geotécnicas identificadas en el área, y que idealmente tengan antecedentes de remociones en masa anteriores que permitan validar los resultados obtenidos.

La aplicación de la metodología en 6 sectores de Viña del Mar, resulta una correcta aproximación de lo que ocurre en la realidad en las laderas, intervenidas o no, que presentan en algunos casos diseños poco sustentables o con soporte suficiente. Si bien no se realizaron análisis de estabilidad para todos los casos críticos (IS alto o muy alto, mayor a 50), el ejemplo presentado en el Anexo K muestran que los resultados de susceptibilidad podrían ser una buena guía para que el municipio atienda algunos sectores puntuales con mayor urgencia, especialmente en los cuales pueden verse afectadas personas.

El dinamismo propio de las zonas urbanas se refleja en el caso de estudio en el sector de 5 Oriente, siendo una ladera no intervenida al inicio del presente estudio (mayo 2011), pero que sin embargo a su término se encontraba intervenida y modificada. Además, durante el período de redacción del presente trabajo (2013) ocurrieron dos eventos de tipo remociones en masa en las unidades de análisis escogidas.

El primero correspondió a un deslizamiento superficial de suelo ocurrido el 10 de junio del 2013 en la unidad 3 del sector Recreo (IS = 62) gatillada por un agente antrópico (vertimiento de aguas desde una vivienda hacia el talud). Si bien el material movilizado fue de poco volumen, el impacto en el tránsito y normal funcionamiento de la ciudad fue alto (ver Fotografías 8.1, 8.2 y 8.3).



**Fotografía 8.1. Unidad 3 – Recreo (2012)**  
Fuente: Obtención propia



**Fotografía 8.2. Deslizamiento de suelo unidad 3 Recreo (10/6/2013)**  
Fuente: Fotografía Pablo Ovalle. Agencia Uno. [www.terra.cl](http://www.terra.cl)



**Fotografía 8.2. Deslizamiento de suelo unidad 3 Recreo (10/6/2013)**  
Fuente: Fotografía Pablo Ovalle. Agencia Uno ([www.terra.cl](http://www.terra.cl))

Como se mencionó anteriormente, en la otra arista del estudio (metodología propuesta para evaluar respuesta sísmica por fallas mayores en áreas urbanas) permite incluirlas dentro de la definición de “áreas de riesgo” según la O.G.U.C, artículo 2.1.17 sin profundizar en un estudio de peligro sísmico, lo que sin duda impone una limitación en el alcance de la metodología, pero permite realizar una primera aproximación al comportamiento de la falla y cumplir con las exigencias legales. Como la metodología propuesta está orientada tanto a fallas activas como inactivas, su aplicación y resultados pueden alertar sobre zonas más sensibles a sufrir una respuesta sísmica mayor por la presencia de fallas, lo que se traduce en una necesidad de estudios sísmicos y estructurales más profundos.

Dado que la propuesta metodológica en este caso está orientada a una evaluación preliminar, los factores ponderados se basan en antecedentes que se puedan obtener sin un estudio de peligro sísmico de la estructura, como por ejemplo en daño acontecido en terremotos históricos (independiente de la fuente sismogénica, el tipo de construcción o causas civiles estructurales). La idea es que sea obtenido a partir de publicaciones en el área de prensa, registros históricos y publicaciones. Las evidencias de terreno juegan un rol importante dentro de los factores ponderados, sabiendo que en ocasiones este parámetro no podrá ser evaluado producto de obras antrópicas que cubran los posibles afloramientos. Esta información puede ser complementada a partir de mapas, imágenes satelitales, fotos aéreas y publicaciones anteriores.

Dado que se postula como hipótesis que puede haber una influencia en la respuesta sísmica de los terrenos por la sola presencia de la falla (independiente del tipo de terremoto) es fundamental la evaluación de la distancia a la traza a cada unidad de análisis. Respecto a las unidades de análisis, en el estudio se proponen unidades subparalelas a la traza de la falla de ancho 100 metros, basándose en criterios urbanos y de estudios anteriores. Sin embargo, su aplicación en otros sectores puede hacer variar esta condición en función de la geometría de la zona urbana y la disposición de la falla. De la misma forma, los límites de las unidades en el caso particular de estudio en el sentido del rumbo de la falla están dados por el océano en un extremo, y en el otro por criterios urbanos.

Dentro de los antecedentes a evaluar se incluyen datos de sismicidad en del área, sabiendo que no es el objetivo de la metodología entender cuáles son las fuentes sísmicas más importantes y sus respectivas recurrencias. Los factores evaluados no incorporan las diferencias geológicas-geotécnicas de los terrenos, ni propiedades mecánicas y sísmicas de los suelos, ni tampoco la geología superficial donde se hacen las construcciones (primeros 30 metros bajo superficie), dado que no está en los objetivos evaluar la respuesta sísmica en función de las propiedades de los suelos (o efecto de sitio) ni tampoco hacer una microzonificación sísmica. En el caso particular del área analizada, Baquedano (2012) realiza un estudio de la dinámica de los suelos y microzonificación sísmica preliminar de las ciudades de Viña del Mar y Valparaíso, basada en la medición de microvibraciones y estimación de la frecuencia fundamental del suelo propuesta por Nakamura (1989). Los resultados de su estudio indican que las frecuencias registradas en toda la zona plana y entorno de estero en Viña de Mar fluctúan entre los 0,3 hasta los 2,4 Hz (consideradas como bajas), por lo que se generarían condiciones locales del suelo favorables para sufrir efecto de sitio en todo el sector Plano de Viña del Mar (indiferenciado).

En el caso particular de estudio (falla Marga-Marga en el área urbana de Viña del Mar), los resultados indican la existencia de una franja que presenta alta a muy susceptibilidad de respuesta sísmica, que abarca parte del plan de Viña del Mar (o Población Vergara) y la proyección de las trazas de la falla hacia el sureste de la ciudad (especialmente en el entorno del estero). En base a los resultados, se plantea la necesidad de profundizar en estudios de peligro sísmicos asociados a la falla y su incorporación en estudios de microzonificación sísmica de áreas urbanas.

A modo de verificación, se aplicó en forma adicional la metodología en la falla reconocida por Gana et al. (1996) que atraviesa Av. Argentina en Valparaíso. Los detalles de la aplicación y factores ponderados se presentan en el Anexo N, sin embargo, se destaca que en el entorno a la Av. Argentina los valores arrojados por la metodología fluctúan entre 28 y 48 (susceptibilidad media) y no se reconoce una franja con mayor susceptibilidad de respuesta sísmica que otra (ver Figura 8.1). Esta información parece consecuente con información histórica del comportamiento sísmico del barrio El Almendral en Valparaíso producto de efecto de sitio dado por los tipos de suelos (Grimme y Álvarez, 1964), y con antecedentes de microzonificación sísmica de Valparaíso (Castañeda y González, 2011; Baquedano, 2012), quienes reconocen zonas con mayor intensidad en ciertos sectores sector plano de Valparaíso producto de depósitos de suelos blandos (Baquedano, 2012).



**Figura 8.1. Mapa de respuesta sísmica por falla Av. Argentina – Valparaíso**  
**Fuente: Elaboración propia.**

Finalmente se destaca como aporte del presente trabajo la posibilidad de utilizar las metodologías propuestas en estudios fundados de riesgos para planes reguladores comunales, o como parte de estudios de pre factibilidad de proyectos de intervención urbana, o como una etapa preliminar a un estudio de estabilidad típico. En el caso de remociones en masa, en muchas ocasiones el análisis de susceptibilidad de remociones en masa se realiza solamente evaluando pendientes y geología. En este trabajo se profundiza en los factores considerados a fin de tener resultados más ajustados a las condiciones reales. En el caso de la metodología para evaluar susceptibilidad de respuesta sísmica por fallas mayores, la propuesta de este trabajo resulta una innovación que permite una primera aproximación.

Sería interesante su aplicación en algunos sectores urbanos de las comunas de Valparaíso, Quilpué y Concón, especialmente en aquellos sectores de alto tránsito y conectividad en el área, o donde se hayan presentado eventos con anterioridad, como por ejemplo, camino Troncal que conecta Viña del Mar con Quilpué, donde el 24 de agosto del 2002 ocurrió un deslizamiento del orden de 50.000 m<sup>2</sup> (Fernández, 2002) con un alto impacto en la dinámica de ambas ciudades, o bien, Av. España que conecta Valparaíso con Viña del Mar y donde se generó el último evento del 10 de junio del 2013.

En el caso de la metodología propuesta para evaluar susceptibilidad por fallas mayores, también se sugiere su uso para estudios fundados de riesgos para planes reguladores, siendo interesante su aplicación en áreas urbanas que hayan sido cuestionadas por la presencia de fallas mayores, como por ejemplo en Concepción (Galli, 1967; Quezada, 1996), falla San Ramón en el sector oriente de Santiago (Vargas et al., 2012), en Antofagasta (Delouis et al., 1997).



## CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES

A continuación se presenta un resumen de las principales conclusiones obtenidas en el presente estudio.

- A partir de la identificación de peligros o amenazas de origen geológico que afectan áreas urbanas y la legislación vigente en Chile en término del estudio de dichas amenazas, la elaboración de metodologías que permitan evaluar susceptibilidad de remociones en masa, y posible respuesta sísmica por fallas mayores en áreas urbanas resulta útil y permite abordar aquellos fenómenos que no están del todo cubiertos por las actuales metodologías.
- A partir de lo anterior, se propone una metodología que permita evaluar susceptibilidad de remociones en masa de tipo deslizamiento traslacionales de roca, deslizamientos rotacionales de suelos o rocas blandas, caídas de rocas, deslizamientos superficiales de suelo y flujos en áreas urbanas, utilizando como base la ponderación de factores condicionantes. Su aplicación y validación se realiza mediante un caso de estudio en la ciudad de Viña del Mar, donde se logra definir laderas con mayor o menor susceptibilidad dentro de sectores 6 definidos como zonas piloto.
- La metodología propuesta requiere evaluar y ponderar el factor antrópico como un agente que aumenta o reduce susceptibilidad a partir de obras robustas o desestabilización causada por el hombre.
- La metodología final propuesta, puede complementarse con la metodología propuesta por Lara (2007), pudiendo aplicarse ambas en función de la morfología del sector de análisis (por ejemplo en cuencas y quebradas habitadas).
- En el área de aplicación, de las 96 unidades analizadas para los 5 tipos de remociones definidas (480 casos), sólo 122 de los casos presentan  $IS > 50$ , concentrándose los valores críticos en caídas de rocas, deslizamientos traslacionales de roca y deslizamientos superficiales de suelo. De las unidades que resultan con menor susceptibilidad, el factor antrópico juega un rol fundamental, ya sea por obras robustas o medidas ya implementadas.
- Las unidades que resultan con mayor susceptibilidad de remociones en masa en áreas urbanas debiesen ser analizadas desde el punto de vista de estabilidad, y desarrollar en ellas trabajos orientados a minimizar la ocurrencia de eventos.
- La metodología para evaluar susceptibilidad de respuesta sísmica por presencia de fallas mayores en áreas urbanas, permite abordar los requerimientos legales en Chile (O.G.U.C, Artículo 2.1.17) y realizar una evaluación preliminar que oriente un estudio de peligro sísmico más detallado de la falla.
- Particularmente en el caso de estudio, la recopilación de información y caracterización geológica y geomorfológica del área, permiten proponer un Mapa Geológico Simplificado de la zona de estudio (Comunas de Valparaíso y Viña del Mar) escala 1:50.000.

- El modelo geológico de los primeros 30 metros bajo la superficie de la comuna, permiten sugerir la existencia de una desembocadura tipo delta del estero Marga-Marga bajo el Plan de la Ciudad, existiendo una interdigitación de sedimentos fluviales y marinos, con el desarrollo de algunas facies lagunares.
- Los antecedentes recopilados y evidencias de terreno, permiten sugerir la existencia de más de una traza de la falla Marga-Marga bajo el Plan de Viña del Mar, lo que además explicaría por qué las trazas definidas por autores anteriores no son coincidentes.
- La aplicación de la metodología para evaluar susceptibilidad de respuesta sísmica en la ciudad de Viña del Mar por la falla Marga-Marga permiten sugerir la existencia de una franja de 900 metros de ancho en el entorno a la traza principal y donde podría existir una respuesta sísmica distinta ante eventos sísmicos de gran magnitud. Se concluye además la existencia de lineamientos paralelos a la traza principal (interpretados como trazas secundarias) que aportarían a la definición de la franja de influencia.
- Lo anterior sugiere la realización de estudios sísmicos y estructurales más profundos de la falla Marga-Marga.
- A modo de validación, la aplicación de la metodología en la falla que atraviesa Av. Argentina (en Valparaíso) presentada en el Anexo N arroja una franja de mediana susceptibilidad de respuesta sísmica por la presencia de esta falla, lo que parece razonable considerando que los daños registrados en el barrio El Almendral en Valparaíso estarían asociados en gran medida a la calidad y tipo de suelos, existiendo además escasos antecedentes y evidencias de terreno de la existencia de dicha estructura.
- Se concluye finalmente que el uso y aplicación de la metodología en otras ciudades mencionadas anteriormente, puede ser una herramienta que permita definir las fallas que requieren estudios más profundos, y a la vez dar cumplimiento a la ley en estudios fundados de riesgos.

## REFERENCIAS

- **Aguiló, A. 1993.** Guía para la Elaboración de Estudios del Medio Físico, Cap. XI. Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT). Madrid, España, 841 pp.
- **Alvarado, P, Barrientos. S, Saez. M, Beck. S. 2008.** Source study and tectonic implications of the historic 1958 Las Melosas crustal earthquake, Chile, compared to earthquake damage. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 175 pp.
- **Álvarez, L. 1964.** Geología del área Valparaíso – Curacaví. Instituto de Investigaciones Geológicas (IIG) Chile, Boletín N.º 16, p. 28 – 60.
- **Araya-Carcedo, F.; Olcina J. 2002.** Riesgos Naturales. Editorial Ariel S.A., 1512 pp.
- **Armijo, R.; R. Rauld; R. Thiele; G. Vargas; J. Campos; R. Lacassin, and E. Kausel. 2010.** The West Andean Thrust, the San Ramón Fault, and the seismic hazard for Santiago, Chile. *Tectonics* 29, TC2007, doi:10.1029/2008TC002427, 34 pp.
- **Arriagada, C., Arancibia, G., Cembrano, G., Martínez, F., Carrizo, D., Van Sint Jan, M., Sáez, E., González, G., Rebolledo, S., Sepúlveda, S.A., Contreras-Reyes, E., Jensen, E., Yañez, G. 2011.** Nature and tectonic significance of co-seismic structures associated with the Mw 8.8 Maule earthquake, central-southern Chile forearc. *Journal of Structural Geology* 33 (2011), p. 891 – 897.
- **Astroza, M.; Cabezas, F.; Moroni, M.; Massone, L.; Ruiz, S.; Parra, E.; Cordero, F.; Morradelli, A. 2010.** Intensidades Sísmicas en el área de daños del Terremoto del 27 de febrero de 2010. Publicación interna Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, 23 pp.
- **Barrientos, S.; Kausel, E. 1993.** Características de la Sismicidad Superficial en la Zona Central de Chile; *Proceedings 6as Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica*, Universidad de Chile, Santiago 9-13 Agosto, 1993, v.1, p. 3-9.
- **Barrientos, S., Vera, E., Alvarado, P., Monfret, T. 2004.** Crustal seismicity in central Chile. *Journal of South American Earth Sciences* 16 (2004), p. 759 – 768.
- **Baquedano, F.J. 2012.** Estudio de dinámica de suelos mediante micro vibraciones y zonificación sísmica preliminar de las ciudades de Valparaíso y Viña del Mar. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil en Obras Civiles. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería en Obras Civiles, Universidad Diego Portales, 86 pp.
- **Belmonte-Pool, J. 1997.** Análisis del Contacto Sismogénico Interplaca a lo Largo de Chile. Santiago: Tesis de Magíster, Depto. de Geofísica. Universidad de Chile, 148 pp.
- **Bieniawski, Z.T., 1989.** Engineering rock mass classifications. New York: Wiley, 272 pp.
- **Bryant, W.; Hart, E. W. 2007.** Fault-Rupture Hazard Zones In California. Alquist-Priolo Earthquake Fault Zoning Act with Index to Earthquake Fault Zones Maps. Special Publication, 42. California Department of Conservation, California Geological Survey, 48 pp.
- **Carrasco, O., Nuñez, C. 2012.** Microzonificación Sísmica de Viña del Mar. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Obras Civiles.

- **Castro, C.; Brignardello, L. 1997.** Geomorfología aplicada a la ordenación territorial de la franja costera entre Concón y Quintay (32°55'S y 33°15'S). *Revista de Geografía Norte Grande*, p. 113 – 125.
- **Castañeda, R., González, A. 2011.** Actualización de la microzonificación sísmica de la ciudad de Valparaíso. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Técnica Federico Santa María. 124 pp.
- **Celebi, M. 1986.** Topographical and Geological Amplifications determined from strong-motion and aftershock records of the 3 march 1985 Chile Earthquake. *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol.77, N°4, p. 1147 – 1167.
- **Charrier, R., Bustamante, M., Comte, D., Elgueta, E., Flynn, J., Iturra, I., Muñoz, N., Pardo, M., Thiele, R., Wyss, A., 2005.** The Abanico extensional basin: Regional extension, chronology of tectonic inversion, and relation to shallow seismic activity and Andean uplift. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abh.* 236 (1-2), p. 43-77.
- **Comte, D., A. Eisenberg, E. Lorca, M. Pardo, L. Ponce, R. Saragoni, S. K. Singh, Suárez, G. 1986.** “The 1985 central Chile earthquake: A repeat of previous great earthquakes in the region?”, *Science*, 233, p. 393-500
- **Corvalán, J.; Munizaga, F. 1972.** Edades radiométricas de rocas intrusivas y metamórficas de la Hoja Valparaíso – San Antonio. Instituto de Investigaciones Geológicas, Chile. *Boletín N.º 28*, 40 pp.
- **Cruden, D.M, and Varnes, D.J., 1996.** Landslide types and processes, in Turner, A. Keith, and Schuster, Robert L. eds. *Landslides—Investigation and mitigation: Transportation Research Board, Special report no. 247, National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C., p. 36–75.*
- **Delouis, B., Monfret, T., Dorbath, L., Pardo, M., Rivera, L., Comte, D., Haessler, H., Caminade, L., Ponce, L., Kausel, E., Cisternas, A. 1997.** The Mw=8.0 Antofagasta Earthquake of July 30, 1995: A precursor of the end of the large 1887 Gap. *Bull. Seismic Society of America*, Vol. 87, N°2, p.1 – 19.
- **DeMets, C., R. G.Gordon, D. F. Argus, and S. Stein, 1990.** “Current plate motions”. *Geophys. J. Int.*, 101, p. 425-478.
- **Erikson, I.; Högstedt, J. 2004.** Landslide Hazard Assessment and Landslide Precipitation Relationship in Valparaíso, Central Chile. Department of Physical Geography Göteborg, 91 pp.
- **Farías, M., Vargas, G., Tassara, A., Carretier, S., Baize, S., Melnick, D., Bataille, K. 2010.** Land-level changes produced by the Mx 8.8 2010 Chilean earthquake. *Science* 329 (5994), 916.
- **Fernández, J.C. 2002.** Deslizamiento del 24 de Agosto de 2002 en el camino Troncal, Comuna de Viña del Mar. *Sernageomin*, 6 pp.
- **Figueroa, H.; Portal, M. 1997.** Geomorfología de los riesgos naturales en la cuenca del estero Marga-Marga Viña del Mar. *Revista Geográfica de Valparaíso*, N° 28. ISSN 0716 – 1905, p. 77 - 108.
- **Fock, A., 2005.** Cronología y tectónica de la exhumación en el neógeno de Los Andes de Chile Central entre los 33° y los 34°S. Tesis de Magíster, Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago.
- **Gajardo, A., Carrasco, R., Espinoza, F., Sepúlveda, F. 2010.** Efectos geológicos del sismo del 27 de febrero de 2010: observaciones en Viña del Mar, Región de Valparaíso. *Sernageomin*, 5 pp.

- **Gajardo, A., Carrasco, R., Espinoza, F., Sepúlveda, F. 2010.** Efectos geológicos del sismo del 27 de febrero de 2010: observaciones en el sector Reñaca-Cochoa, Comuna de Viña del Mar, Región de Valparaíso. Sernageomin, 6 pp.
- **Galdames, G; Saragoni, R. 2002.** Influencia del posible movimiento de la falla Marga-Marga en el daño de edificios altos de Viña del Mar en el terremoto de Chile de 1985. VIII Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Abril 2002. UTFSM. Valparaíso, 6pp.
- **Galli, C. 1967.** Geología Urbana y suelo de fundación de Concepción y Talcahuano", Concepción. Universidad de Concepción.
- **Gana, P.; Wall, R.; Gutiérrez, A. 1996.** Mapa Geológico del Área Valparaíso – Curacaví. Regiones de Valparaíso y Metropolitana. Mapa Geológico Sernageomin N° 1. Mapa Escala 1:100.000, Leyenda Ampliada y Listado de Yacimientos, 21 pp.
- **González de Vallejo, L.; Ferrer, M.; Ortuño, L.; Oteo, C. 2002.** Ingeniería Geológica. Editorial Pearson. 744pp
- **Goodman, R.E., 1989.** Introduction to Rock Mechanics. New York: Wiley & Sons, 2<sup>nd</sup> Edition, 562 pp.
- **Grimme, K.; Álvarez, L. 1964.** El Suelo de fundación de Valparaíso y Viña del Mar. Provincia de Valparaíso y Geología del Área de Viña del Mar. Instituto de Investigaciones Geológicas Chile. Boletín N° 16, p. 1- 27.
- **Hauser, A. 2002.** Informe de opinión en relación con visita a terreno removido en flanco poniente del Cerro Barón, Quinta Región. Minuta Sernageomin, 12081-2, 4 pp.
- **Hauser, A. 2003.** Diagnóstico Geológico Geotécnico de seis sectores de laderas y taludes inestables, en casco urbano de la Ciudad de Valparaíso, Quinta Región: Alternativas de Tratamiento. Sernageomin, 44 pp.
- **Hoek, E.; Kaiser, P. K.; Bawden, W. F.1995.** Support of Underground Excavations in Hard Rock. A.A. Balkema / Rotterdam / Brookfield. 215 pp.
- **Hoek, E., Bray, J.W., 1981.** Rock Slope Engineering. London: Institution of Mining and Metallurgy, 3rd Edition. 358 pp.
- **Jibson, R.W., Harp, E.L. & Michael, J.A., 1998.** A Method for Producing Digital Probabilistic Seismic Landslide Hazard Maps: An Example from the Los Angeles, California Area. Denver: U.S. Geological Survey Open-File Report, p. 98-113
- **Keefer, D.K., 1984.** Landslides caused by earthquakes. Geological Society of America Bulletin, vol. 95, p. 406-421
- **Keller, E.; Blodget, R. 2004.** Riesgos naturales. Procesos de la Tierra como riesgos, desastres y catástrofes. Editorial Pearson, S.A., Madrid 2004. 448 pp.
- **Kendrick, E., Bevis, M., Smalley Jr., R., Brooks, B., Barriga Vargas, R., Lauría, E., Souto Fortes, L.P. (2003).** The Nazca–South America Euler vector and its rate of change. Journal of South American Earth Sciences, 16, 2, p. 125-131.
- **Kerr, J.; Nathan, S.; Van Dissen, R.; Webb, P.; Brunsdon, D.; King, A. 2003.** Planning for development of land on close to active faults. A guideline to assist resource management planners in New Zealand. Ministry for the Environment, New Zealand – Institute of Geological & Nuclear Sciences. 71pp.
- **Laubscher, D. H. 1990.** A geomechanics classification system for the rating of rock mass in mine design. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, vol 90, n° 10, p. 257 – 273.

- **Lomnitz, C. 1961.** Los terremotos del 4 de Septiembre de en el Cajón del Maipo. Anales de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Publicación 3, Depto. de Geofísica, 18. pp. 279–306.
- **Lomnitz, C. 1971.** Grandes terremotos y tsunamis en Chile durante el período 1535-1955. Geofis. Panamericana, 1, p. 151-178.
- **Lara, M. 2007.** Metodología para la evaluación y zonificación de Peligro de Remociones en Masa con Aplicación en la Quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana. Tesis para optar el Grado de Magíster en Ciencias Mención Geología y Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología, 212 p.
- **Lépez, M.; Wall, R.; Prat, M. 2005.** Peligro de Remociones en Masa e Inundaciones de las ciudades de Valparaíso, Viña del Mar y Concón. Región de Valparaíso. Servicio Nacional de Geología y Minería. Informe Registrado. IR-05-29, 24p, 1 anexo, 2 mapas en 6 hojas escala 1:10.000, 24 pp.
- **Leyton, F.; Ruiz, S.; Sepúlveda, S. 2010.** Reevaluación del peligro sísmico probabilística en Chile Central. Andean Geology. Versión on-line. ISSN 0718-7106. V. 37, n° 2. Julio 2010, 21 pp.
- **Madariaga, R. 1998.** Física de la Tierra TS5N: 0214-4557. 1998, n.10, p. 221-255 Sismicidad de Chile.
- **Mardones, M.; Vidal, C. 2001.** La zonificación y evaluación de los riesgos naturales de tipo geomorfológico: un instrumento para la planificación urbana en la ciudad de Concepción. EURE (Santiago) ISSN 0250-716.
- **Marín, M.; Espinoza, C.; Ortiz, M. 2010.** Efectos geológicos del sismo del 27 de febrero de 2010: observaciones y daños en la ciudad de Valparaíso, Región de Valparaíso. SERNAGEOMIN, Marzo 2010. 5 pp.
- **Monett, A. 1996.** Procesos Ambientales en las comunas de Valparaíso y Viña del Mar: los movimientos en masa y su impacto en las áreas urbanas. Memoria para optar al título de Geógrafo, PUC.
- **Monge J.; M. Astroza. 1989.** Metodología para determinar el grado de intensidad a partir de los daños, 5as Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Vol. 1, Santiago, Chile, pp. 483-492.
- **Muñoz, E., Sepúlveda, S.A., Rebolledo, S. 2012.** Nuevos antecedentes sobre la falla Marga-Marga y sus implicancias en el peligro sísmico, T9, p. 854 – 856.
- **Pérez, L.E. 1988.** Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Viña del Mar. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Obras Civiles.
- **Pérez, P. 2000.** Amplificación Sísmica en Suelos y Microzonificación de los sectores Planos de Viña del Mar y Valparaíso. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Obras Civiles.
- **Prada, F., Ramos, A., Solaque, D., Caicedo, B. 2011.** Confiabilidad aplicada al diseño geotécnico de un muro de contención Obras y proyectos. Obras y Proyectos no.9 Concepción, versión ISSN 0718-2813
- **Priest, S. 1993.** Discontinuity Analysis for Rock Engineering. Capman & Hall, London 473 p.
- **Quezada Flory, J. 1996.** Geología urbana y ambiental de la ciudad de Concepción. Memoria de Título Universidad de Concepción, carrera de Geología.
- **Ramírez, P.; Vivallo, J. 2009.** Microzonificación sísmica de la ciudad de Concepción – Chile. XII Chilean Geological Conference, Congreso Geológico Chileno, Santiago.

- **Rauld, R.; Fernández, J.C. 2002.** Deslizamientos en Viña del Mar y Valparaíso. Casos y Causas. Simposio Internacional de Geología Ambiental para Planificación del Uso del Territorio. Puerto Varas, p. 169 – 172.
- **Rauld, R.A., 2002.** Análisis morfoestructural del frente cordillerano de Santiago Oriente, entre el río Mapocho y la Quebrada Macul. Memoria, Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago, 57 p.
- **Rauld, R.A. 2011.** Deformación Cortical y Peligro Sísmico Asociado a la Falla San Ramón en el Frente Cordillerano de Santiago, Chile Central (33° S). Tesis de grado para optar al grado de doctor en ciencias mención geología. Universidad de Chile, Departamento de Geología: 311 pp.
- **Rauld, R., Leyton, F., Urresty, C. 2011.** Estudio Fundado De Riesgos. Diagnóstico de Peligros Naturales en la Comuna de Coronel, VIII Región del Bío-Bío. Plan Regulador Comunal De Coronel. Etapa II Entrega Final - 11 de abril de 2011. 83 pp.
- **Rivano, S.; Sepúlveda, P., et. al. 1993.** Carta Geológica de Chile. Hojas Quillota Portillo V Región Escala 1:250.000. Sernageomin.
- **Rodríguez Rozas, A.; Gajardo Cruzat, C. 1906.** La gran catástrofe de 16 de agosto de 1906 en la República de Chile. Imprenta Barcelona, 356 pp.
- **Roldan, W., Tapia, P., Villacis, C. 2002.** Evaluación de la Vulnerabilidad Sísmica en zonas urbanas. Una herramienta de integración. 25 pp.
- **Romero, W. et al., 2010.** Preinforme del impacto sufrido por los GPS debido al terremoto del 27 de febrero de 2010. Ilustre Municipalidad de Viña Del Mar, Dirección de Obras Municipales. Oficina De Catastro. Informe Inédito.
- **Ruiz, S. 2002.** Fórmulas de atenuación para la subducción de Chile considerando los dos mecanismos principales de sismogénesis y los efectos del suelo y asperezas”. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Depto. de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, U. de Chile.
- **Ruiz, S. y G.R. Saragoni. 2005.** “Fórmulas de atenuación para la subducción de Chile considerando los dos mecanismos de sismogénesis y los efectos del suelo”. IX Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Concepción, p. 16-19.
- **Sabaj, R. 2008.** Identificación y caracterización de estructuras potencialmente activas en la cordillera de la costa, entre los 33° y 33°45' Sur. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología.
- **Selby, M.J., 1993.** Hill slope materials and processes. Second Edition, Oxford University Press, 451 pp.
- **Sepúlveda, S.A., 1998.** Metodología para Evaluar el Peligro de Flujos de Detritos en Ambientes Montañosos: Aplicación en la Quebrada Lo Cañas, Región Metropolitana. Memoria para optar al Título de Geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- **Sepúlveda, S.A. y Serey, A. 2009.** Tsunamigenic, earthquake-triggered rock slope failures during the 21st of April 2007 Aysén earthquake, southern Chile (45.5°S). Geological Note. Andean Geology 36 (1), pp. 131-136.
- **Thorson, R. 1999.** La Falla de “Marga – Marga”, Viña del Mar, Chile. Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María.
- **Toro, K. 2007.** Influencia de las características geológicas en las propiedades geotécnicas de granitoides jurásicos y suelos asociados en la Ruta 68. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología.

- **Vargas, G.; Rebolledo, S. 2012.** Paleosismología de la Falla San Ramón e implicancias para el peligro sísmico de Santiago. XIII Congreso Geológico Chileno, Antofagasta. Pag 851 – 853.
- **Verdugo, A. 1996.** Estudio Geofísico de los suelos de fundación para una zonificación sísmica de Valparaíso y Viña del Mar. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Estructural.
- **Wall, R.; Gana, P.; Gutiérrez, A. 1996.** Mapa Geológico del área de San Antonio-Melipilla, regiones de Valparaíso, Metropolitana y del Libertador General Bernardo O'Higgins. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos, No. 2, 1 mapa (1:100.000)
- **Verdugo, R.; Camus, C.; Campos, J. 2005.** Fenómeno de amplificación sísmica de depósitos de suelos. IX Jornadas Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica. Universidad de Concepción. N° A07-05
- **Youngs, R.R.; Chou, S.; Silva, W.; Humphrey, J. 1997.** Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquakes. Seismological Research Letters. Volume 68, Number 1, p. 58 - 73



## BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

- Centro de Investigación y Gestión de Recursos Naturales. Universidad de Valparaíso. Octubre 2004. Estudio Situación y de caracterización del sector agrícola de la V Región.
- Cees van Westen; Tshehai Woldai; Siefko Slob; Ruben Vargas. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), Enschede, The Netherlands. UNESCO RAPCA. <http://www.itc.nl/external/unesco-rapca/start.html>
- Guía Análisis de Riesgos Naturales para el Ordenamiento Territorial, Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE), Gobierno de Chile, Junio 2011. Registro de Propiedad Intelectual N°: 205-409. I.S.B.N.: 978-956-8468-34-7
- Informe en informe Diagnóstico Microzonificación borde costero. GORE Valparaíso, División de Planificación y Desarrollo. 2009.
- Ledezma, C. 2010. Ingeniería Geotécnica y Riesgo Sísmico. Apuntes Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Norma Chilena Oficial. Diseño Sísmico de Edificios. NCh433.Of.1996. Instituto Chileno de Normalización y modificaciones 2010 y 2011.
- Seremi MINVU V Región. 2011. Resultados Estudio de Riesgos Comuna de Santo Domingo. Consultora Marcela Rivas y Asociados. Varios autores.
- SERNAGEOMIN, 2004. Geología para el Ordenamiento Territorial de la Región de Valparaíso. Informe Registrado IR-04-23, 49p, 2 mapas escala 1:250.000.