



ILUSTRE MUNICIPALIDAD DE LOS MUERMOS

**PLAN REGULADOR COMUNAL DE LOS MUERMOS
REGIÓN DE LOS LAGOS**

ESTUDIO DE RIESGOS

JULIO, 2013

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN	6
1.1	Ubicación Área de Estudio	6
1.2	Objetivos.....	6
1.3	Alcance y limitaciones	8
1.4	Marco Jurídico	8
1.5	Aspectos Metodológicos.....	9
1.5.1	Elaboración de Línea Base geológica y geomorfológica.....	9
1.5.2	Visita técnica al área de estudio.....	10
1.5.3	Inventario de Peligros Geológicos.....	10
2.	MARCO CONCEPTUAL	13
2.1	Peligros Geológicos en Chile.....	13
3.	PELIGROS GEOLÓGICOS A SER ESTUDIADOS	15
3.1	Procesos Internos o Endógenos de la Tierra	15
3.1.1	Sismicidad	15
3.1.2	Volcanismo	21
3.2	Procesos Exógenos o Externos de la Tierra	24
3.2.1	Inundaciones Terrestres y Litorales	24
3.2.1.1	Inundación por Desborde de Cauces	24
3.2.1.2	Inundación por Acumulación de Aguas Lluvias en Zonas Llanas, o Anegamiento	25
3.2.2	Procesos de Remoción en Masa.....	26
3.2.2.1	Desprendimientos o Caída de Rocas.....	26
3.2.2.2	Deslizamientos	28
3.2.2.3	Flujos de Detritos y Barro.....	29
3.3	Resumen de Peligros Geológicos	31
4.	LÍNEA DE BASE	33
4.1	Marco Hidrológico.....	33
4.2	Marco Geodinámico.....	34
4.3	Marco Geomorfológico	35
4.4	Marco Geológico Comunal	43
4.4.1	Unidades de Roca	43
4.4.1.1	Unidades estratificadas	43
4.4.1.2	Depósitos No Consolidados Fluviales, Aluviales y Coluviales (Pleistoceno-Holoceno).....	43
4.4.1.3	Depósitos No Consolidados Glaciares (Pleistoceno-Holoceno).....	45
4.5	Marco Geológico Local.....	45
4.5.1	Depósitos Fluviales Activos.....	45
4.5.2	Depósitos Fluvioglaciares Antiguos.....	45
4.5.2.1	Depósitos Glaciares 1	46
4.5.2.2	Depósitos Glaciares 2	46
4.5.2.3	Depósitos Glaciares 3	46
4.6	Marco Hidrogeológico.....	46
5.	INVENTARIO PRELIMINAR DE PELIGROS GEOLÓGICOS.....	49
5.1	Volcanismo	49
5.1.1	Volcán Puntagudo	49
5.1.2	Cordón Los Cenizos	49
5.1.3	Volcán Osorno	53
5.1.4	Volcán Calbuco	53
5.1.5	Volcán Hualaihué o Apagado	53
5.1.6	Volcán Yate	53
5.1.7	Volcán Hornopirén.....	53
5.1.8	Volcán Huequi	54
5.1.9	Volcán Cayutué-La Viguera.....	54
5.1.10	Diagnóstico General del Peligro Volcánico Inventariado.....	55

5.2	<i>Sismicidad</i>	55
5.2.1	<i>Sismos registrados por la red sismológica mundial.</i>	60
5.2.2	<i>Principales fuentes sísmicas reconocidas en el área de estudio.</i>	62
5.2.2.1	<i>Sismos Interplaca tipo Thrust</i>	62
5.2.2.2	<i>Sismos Intraplaca de Profundidad Intermedia</i>	62
5.2.2.3	<i>Sismos Corticales</i>	62
5.2.3	<i>Estudios previos del Peligro Sísmico en el área de estudio</i>	62
5.2.4	<i>Respuesta sísmica en el emplazamiento</i>	65
5.3	<i>Inventario de inundaciones terrestres y litorales registradas en el área de estudio</i>	68
5.4	<i>Inventario procesos de remoción en masa registrados en el área de estudio</i>	69
6.	DIAGNÓSTICO Y ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD A LOS PELIGROS GEOLÓGICOS QUE PUEDEN AFECTAR EL ÁREA DE ESTUDIO	70
6.1	<i>Peligros No Zonificables</i>	70
6.1.1	<i>Peligro Sísmico</i>	70
6.1.2	<i>Peligro Volcánico</i>	70
6.1.3	<i>Susceptibilidad Erosión</i>	77
6.2	<i>Peligros Zonificables</i>	80
6.2.1	<i>Inundaciones y Flujos de Barro o Detritos</i>	80
6.2.2	<i>Peligro de Remociones en Masa</i>	84
6.2.2.1	<i>Reactivación de movimientos antiguos</i>	84
7.	SÍNTESIS DE LOS PELIGROS GEOLÓGICOS ANALIZADOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO	89
8.	RECOMENDACIONES	97
9.	REFERENCIAS CITADAS EN EL TEXTO	99

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA Nº 1-1	UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	7
FIGURA Nº 2-1	ETAPAS DE LA EVALUACIÓN DE UN EVENTO GEOLÓGICO PELIGROSO	14
FIGURA Nº 3-1	SISMICIDAD MUNDIAL ENTRE LOS AÑOS 1980 Y 1990, SE REPRESENTAN EN PUNTOS ROJOS LOS EPICENTROS CON MAGNITUD >5. NÓTESE COMO LA SISMICIDAD "ILUMINA" LOS LÍMITES DE LAS PLACAS TECTÓNICAS, DIBUJADOS EN AMARILLO	15
FIGURA Nº 3-2	CONTEXTOGEODINÁMICO Y MARGEN DE SUBDUCCIÓN DE CHILE	16
FIGURA Nº 3-3	TIPOS DE SISMOS QUE OCURREN EN UN MARGEN DE SUBDUCCIÓN (EXPLICACIÓN EN EL TEXTO)	17
FIGURA Nº 3-4	TIPOS DE FALLA Y ESFUERZOS ASOCIADOS	18
FIGURA Nº 3-5	TIPOS DE ONDAS SÍSMICAS	19
FIGURA Nº 3-6	AMPLIFICACIÓN DE LA VIBRACIÓN GENERADA POR UN TERREMOTO	19
FIGURA Nº 3-7	PELIGROS VOLCÁNICOS ASOCIADOS A LA ERUPCIÓN DE UN VOLCÁN	21
FIGURA Nº 3-8	CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE INUNDACIONES	24
FIGURA Nº 3-9	CLASIFICACIÓN DE TIPOS DE REMOCIÓN EN MASA EN RELACIÓN AL MOVIMIENTO QUE LO ORIGINA Y EL MATERIAL CONSTITUYENTE DE LA LADERA	27
FIGURA Nº 3-10	EJEMPLOS DE DESLIZAMIENTOS. A. DESLIZAMIENTO ROTACIONAL, B. DESLIZAMIENTO TRASLACIONAL	28
FIGURA Nº 3-11	EJEMPLO DE EROSIÓN POR RETROCESO DE TERRAZAS, APLICADO AL DESARROLLO DE PLANICIES DE ABRASIÓN	29
FIGURA Nº 4-1:	PRINCIPALES CUENCAS DEL ÁREA DE ESTUDIO	33

FIGURA Nº 4-2 VISTA EN 3D DONDE SE REPRESENTA EL MARCO GEODINÁMICO, SE APRECIA LA DORSAL DE JUAN FERNÁNDEZ Y EL LUGAR DONDE ES SUBDUCTADA FRENTE A LOS 33° S. LA LÍNEA VERDE SEÑALA LA FOSA, LUGAR DONDE SUBDUCTA LA PLACA DE NAZCA BAJO LA PLACA SUDAMERICANA, LAS FLECHAS MUESTRAN LAS DIRECCIONES Y VELOCIDADES DE CONVERGENCIA ENTRE AMBAS PLACAS	34
FIGURA Nº 4-3: SEGMENTACIÓN ANDINA	36
FIGURA Nº 4-4 CARTA DE ELEVACIÓN CAÑITAS-RÍO FRÍO	37
FIGURA Nº 4-5 CARTA DE ELEVACIÓN LOS MUERMOS	38
FIGURA Nº 4-6 CARTA DE PENDIENTES CAÑITAS-RÍO FRÍO	39
FIGURA Nº 4-7 CARTA DE PENDIENTES LOS MUERMOS	40
FIGURA Nº 4-8 CARTA DE EXPOSICIÓN CAÑITAS-RÍO FRÍO	41
FIGURA Nº 4-9 CARTA DE EXPOSICIÓN LOS MUERMOS	42
FIGURA Nº 4-10: MAPA GEOLÓGICO DEL ÁREA DE ESTUDIO	44
FIGURA Nº 4-11 GEOLOGÍA DEL ÁREA LOS MUERMOS	47
FIGURA Nº 4-12 GEOLOGÍA DEL ÁREA CAÑITAS – RÍO FRÍO	48
FIGURA Nº 5-1 MAPA GENERAL DE LA ZONA VOLCÁNICA SUR	50
FIGURA Nº 5-2 UBICACIÓN DE LOS PRINCIPALES VOLCANES DE LA ZONA DE ESTUDIO	55
FIGURA Nº 5-3: TERREMOTOS DE SUBDUCCIÓN HISTÓRICOS CON MAGNITUD ESTIMADA Y CALCULADA MAYOR A 7.2, Y SUS ÁREAS DE RUPTURA. EN LÍNEA CONTINUA LAS ZONAS DE RUPTURA BIEN IDENTIFICADAS, EN LÍNEA DISCONTINUA LAS ZONAS DE RUPTURA INFERIDAS A PARTIR DE DATOS HISTÓRICOS.	57
FIGURA Nº 5-4: ÁREA DE RUPTURA (ENCERRADO EN ELIPSE ROJA) E INTENSIDAD DE DAÑO OBSERVADA PARA LOS TERREMOTOS DE: 1575 (M 8.5), 1737 (M 7.5-8.0), 1837 (M 8.0) Y 1960 (M 9.5).	59
FIGURA Nº 5-5: MAPA TOPOGRÁFICO CON LOS EVENTOS HISTÓRICOS DE MAGNITUD SUPERIOR A 7.0 OCURRIDOS EN LA ZONA. LA INFORMACIÓN DE LOS TERREMOTOS SE PRESENTA EN EL CUADRO Nº 5-3	60
FIGURA Nº 5-6: MAPA REGIONAL CON LA SISMICIDAD DOMINANTE DEL ÁREA DE ESTUDIO	61
FIGURA Nº 5-7 MAPA DE FALLAS ACTIVAS DEL ÁREA DE ESTUDIO	63
FIGURA Nº 5-8 PROBABILIDADES DE QUE OCURRA UN TERREMOTO DE MAGNITUD SUPERIOR A 7.0-7.5 PARA EL PERÍODO COMPRENDIDO ENTRE 2004-2024. PARA SU DETERMINACIÓN, SE CONSIDERARON LAS SIGUIENTES DISTRIBUCIONES: (A) POISSON, (B) WEIBULL, DETERMINADA MEDIANTE MÍNIMOS CUADRADOS, Y (C) WEIBULL, DETERMINADA MEDIANTE MÁXIMA VEROSIMILITUD (SUSA, 2004)	64
FIGURA Nº 5-9 ESTIMACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO ELABORADO POR EL PROGRAMA GSHAP (GIARDINI Y OTROS, 1992). LA ACELERACIÓN HORIZONTAL MÁXIMA (EN M/S ²) EXPRESADA EN LAS ISOLINEAS TIENE UN 10% DE PROBABILIDAD DE SER EXCEDIDA EN 50 AÑOS	65
FIGURA Nº 5-10 DISTANCIA MÁXIMA HASTA LA QUE SE HAN OBSERVADO ESTRUCTURAS DE LICUEFACCIÓN EN TERREMOTOS SUPERFICIALES, EN FUNCIÓN DE LA MAGNITUD DEL SISMO (OBERMEIER, 1996). LA FRANJA DE COLOR CORRESPONDE A NUESTRA ZONA DE ESTUDIO Y SE REPRESENTA EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA EPICENTRAL HISTÓRICA REGISTRADA	66
FIGURA Nº 5-11 TIPOS DE SUELOS DE LA COMUNA DE LOS MUERMOS	67
FIGURA Nº 6-1 PATRÓN DE VIENTOS, PARA EL VOLCÁN YATE A 25, 15, 10 Y 5 KM S.N.M. ROSETAS DE VIENTO QUE MUESTRAN LOS VIENTOS QUE SOPLAN DIARIAMENTE, INDICANDO LA CANTIDAD EN LA PARTE CENTRAL DE LA ROSETA, CADA BARRA REPRESENTA UN RANGO DE 10 °	73

FIGURA Nº 6-2 PATRÓN DE VIENTOS, PARA EL VOLCÁN HORNOPIRÉN A 25, 15, 10 Y 5 KM S.N.M. ROSETAS DE VIENTO QUE MUESTRAN LOS VIENTOS QUE SOPLAN DIARIAMENTE, INDICANDO LA CANTIDAD EN LA PARTE CENTRAL DE LA ROSETA, CADA BARRA REPRESENTA UN RANGO DE 10 °	73
FIGURA Nº 6-3 PATRÓN DE VIENTOS, PARA EL VOLCÁN HUALAIHUÉ A 25, 15, 10 Y 5 KM S.N.M. ROSETAS DE VIENTO QUE MUESTRAN LOS VIENTOS QUE SOPLAN DIARIAMENTE, INDICANDO LA CANTIDAD EN LA PARTE CENTRAL DE LA ROSETA, CADA BARRA REPRESENTA UN RANGO DE 10 °	74
FIGURA Nº 6-4 PATRÓN DE VIENTOS, PARA EL VOLCÁN HUEQUI A 25, 15, 10 Y 5 KM S.N.M. ROSETAS DE VIENTO QUE MUESTRAN LOS VIENTOS QUE SOPLAN DIARIAMENTE, INDICANDO LA CANTIDAD EN LA PARTE CENTRAL DE LA ROSETA, CADA BARRA REPRESENTA UN RANGO DE 10 °	74
FIGURA Nº 6-5 EN LA FIGURA A Y B SE MUESTRAN LOS MAPAS ISOPACAS DE 10 CM Y LAS ISOPLETAS DE LOS VOLCANES APAGADO, HORNOPIRÉN Y YATE	75
FIGURA Nº 6-6 MAPAS DE ISOPACAS DE 10 CM DE LOS VOLCANES CALBUCO Y LA VIGUERÍA	75
FIGURA Nº 6-7 MAPA DE ISÓPACAS DE 10 CM DE LOS VOILCANES MICHINMAHUIDA, CHAITEN, CORCOVADA Y YANTELES-NEVADO.	76
FIGURA Nº 6-8 CLASIFICACIÓN DE EROSIÓN DE SUELOS	78
FIGURA Nº 6-9 SUPERFICIE DE EROSIÓN ACTUAL EN LA COMUNA DE LOS MUERMOS	79
FIGURA Nº 6-10 ESTADÍSTICA DEL ÍNDICE DE RIESGO DE EROSIÓN POTENCIAL EN LA COMUNA DE LOS MUERMOS	79
FIGURA Nº 6-11 ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD DE INUNDACIONES DE LA LOCALIDAD DE RÍO FRÍO-CAÑITAS	82
FIGURA Nº 6-12 ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD DE INUNDACIONES DE LA LOCALIDAD DE LOS MUERMOS	83
FIGURA Nº 6-13 FRECUENCIA DE DESLIZAMIENTOS EN FUNCIÓN DE LA PENDIENTE DEL TERRENO	84
FIGURA Nº 6-14 FUNCIONAMIENTO TÍPICO DE LA REPTACIÓN	85
FIGURA Nº 6-15 ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN MASA DE LA LOCALIDAD DE RÍO FRÍO-CAÑITAS	87
FIGURA Nº 6-16 ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN MASA DE LA LOCALIDAD DE LOS MUERMOS	88
FIGURA Nº 7-1 MAPA DE SÍNTESIS DE LOS PELIGROS GEOLÓGICOS ANALIZADOS EN RÍO FRÍO - CAÑITAS	95
FIGURA Nº 7-2 MAPA DE SÍNTESIS DE LOS PELIGROS GEOLÓGICOS ANALIZADOS EN LOS MUERMOS	96

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO N° 3-1 PELIGROS ASOCIADOS AL VOLCANISMO	23
CUADRO N° 3-2 RESUMEN PELIGROS GEOLÓGICOS A SER ESTUDIADOS Y SU ESCALA DE TRABAJO	32
CUADRO N° 5-1 REGISTRO HISTÓRICO DE PRINCIPALES ERUPCIONES VOLCÁNICAS HISTÓRICAS	50
CUADRO N° 5-2: DATOS DE TERREMOTOS DE MAGNITUD DESCONOCIDA OCURRIDOS EN LA ZONA.	56
CUADRO N° 5-3: DATOS DE TERREMOTOS DE MAGNITUD SUPERIOR A 7.0 OCURRIDOS EN LA ZONA.	58
CUADRO N° 6-1 ESCENARIOS ERUPTIVOS CONSIDERADOS PARA LOS DISTINTOS VOLCANES. VEI: ÍNDICE DE EXPLOSIVIDAD VOLCÁNICA	71
CUADRO N° 6-2 REGISTRO PLUVIOMÉTRICO MENSUAL PROMEDIO DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE PUERTO MONTT – EL TEPUAL (41° 25' S, 73° 05' W, 85 MSNM)	80
CUADRO N° 6-3 INFLUENCIA DE LOS DIFERENTES FACTORES EN LAS CONDICIONES DE LOS MATERIALES Y DE LAS LADERAS	86
CUADRO N° 7-1 SÍNTESIS DE PELIGRO VOLCÁNICO PARA EL ÁREA DE ESTUDIO, DESCRIPCIÓN, INVENTARIO, METODOLOGÍA Y ZONIFICACIÓN.....	90
CUADRO N° 7-2 SÍNTESIS DE PELIGRO SÍSMICO PARA EL ÁREA DE ESTUDIO, DESCRIPCIÓN, INVENTARIO, METODOLOGÍA Y ZONIFICACIÓN.....	91
CUADRO N° 7-3 SÍNTESIS DE PELIGRO DE INUNDACIONES PARA EL ÁREA DE ESTUDIO, DESCRIPCIÓN, INVENTARIO, METODOLOGÍA Y ZONIFICACIÓN.....	93
CUADRO N° 7-4 SÍNTESIS DE PELIGRO DE REMOCIONES EN MASA PARA EL ÁREA DE ESTUDIO, DESCRIPCIÓN, INVENTARIO, METODOLOGÍA Y ZONIFICACIÓN.....	94
CUADRO N° 8-1 CRITERIOS UTILIZADOS PARA DEFINIR LA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD Y LA ZONIFICACIÓN URBANA PROPUESTA PARA CADA CASO	98

ÍNDICE DE MAPAS FUERA DE TEXTO

PLANO N° 1: Mapa Geológico de Río Frío - Cañitas
PLANO N° 2: Mapa Geológico de Los Muermos
PLANO N° 3: Mapa Síntesis de Peligros Geológicos Río Frío - Cañitas
PLANO N° 4: Mapa Síntesis de Peligros Geológicos Los Muermos

1. INTRODUCCIÓN

La Secretaría Regional Ministerial de Vivienda y Urbanismo Región de La Región de los Lagos, ha adjudicado a Infracon S.A. la actualización del Plan Regulador Comunal de Los Muermos, que incluye la capital comunal de Los Muermos, además de las localidades de Cañitas y Río Frío. Como parte de este proceso se elabora un estudio de riesgo de sismos, volcanismo, remoción en masa, inundación por desborde de cauces y canales para el área urbana de la comuna con el objetivo de reunir información, que sirva de base, para definir zonas de riesgo y zonas no edificables para la formulación de los respectivos instrumentos de planificación territorial (IPT).

1.1 Ubicación Área de Estudio

El área de estudio está ubicada en la comuna de Los Muermos, al oeste de la Provincia de Llanquihue, entre los 41.28°S y los 41.42° Latitud Sur y los 73.42° y los 73.49° de Longitud Oeste en la X Región de Los Lagos. La comuna de Los Muermos, limita al norte con la comuna de Fresia, al sur con el río Maullín, al este con la comuna de Puerto Varas y Puerto Montt y al oeste con el Océano Pacífico. Abarca una superficie de 1.246 km² y se sitúa en el sector poniente de la Provincia de Llanquihue, a aproximadamente 45 Kilómetros de la ciudad de Puerto Montt. Los principales centros poblados lo constituyen el área urbana de Los Muermos, Cañitas y Río Frío (FIGURA N° 1-1A continuación se detalla la metodología utilizada para la elaboración de cada uno de los puntos nombrados previamente.).

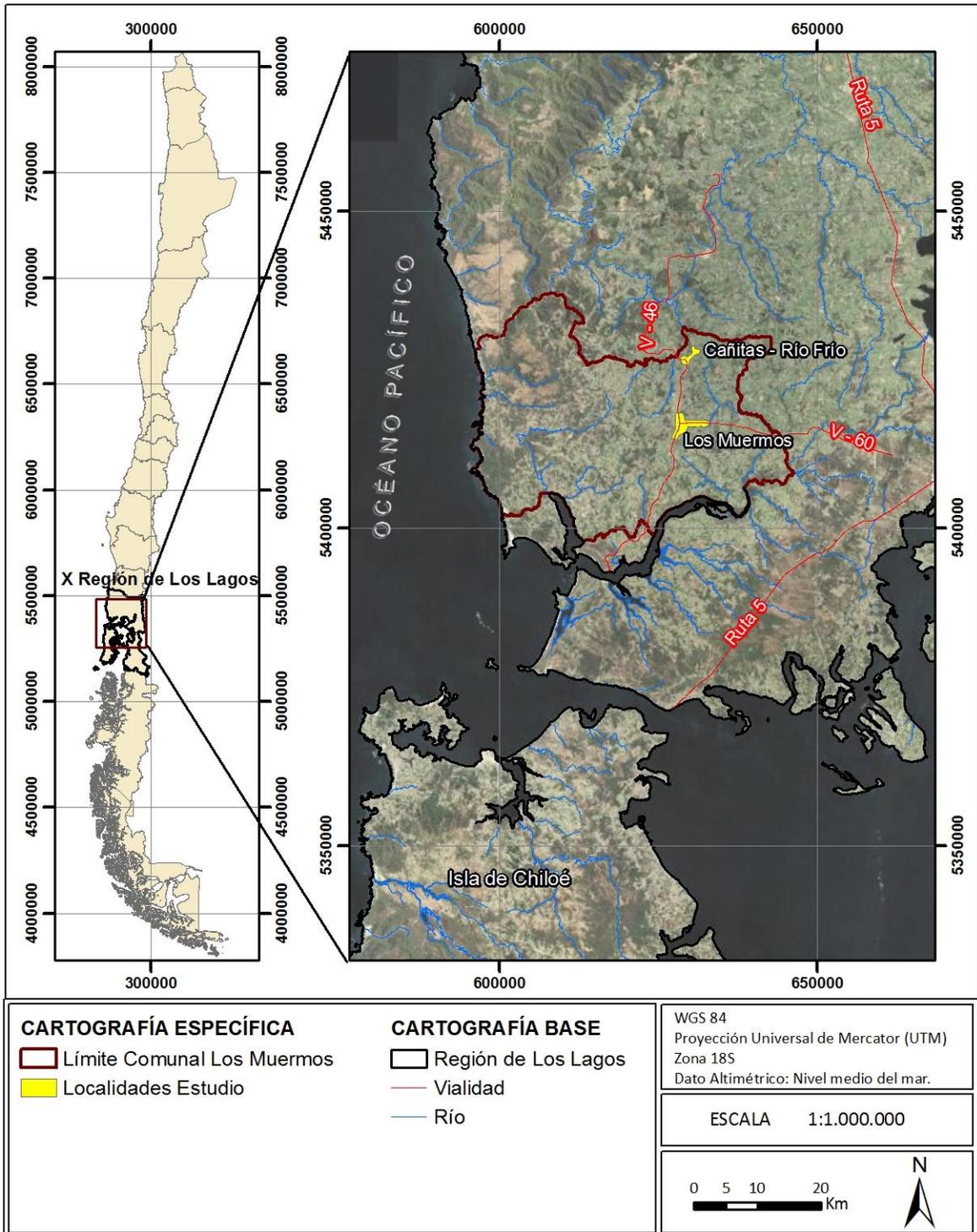
Los principales accesos al área de estudio corresponden a la ruta V-60 que une a Los Muermos con la ciudad de Puerto Montt y el aeropuerto de Tepual; la ruta V-50 que une Los Muermos, Cañitas y Río Frío con Puerto Varas; la ruta V-46 que une Los Muermos con Maullín.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es reconocer y delimitar las áreas de riesgos que han de ser incorporadas y/o adecuadas en la Actualización del Plan Regulador Comunal Los Muermos, sectores de Los Muermos, Cañitas y Río Frío, con la finalidad de mitigar los eventuales riesgos naturales en la zona de estudio, de acuerdo a lo señalado por el artículo 2.1.17 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, generando un estudio fundado de Riesgos Geológicos en las áreas urbanas de la comuna de Los Muermos ya nombradas para este estudio.

Dentro de este estudio, como productos, se han elaborado una línea base geológica y geomorfológica del territorio, además de un inventario, descripción y diagnóstico de los principales peligros geológicos que pueden afectar al área de estudio. Toda esta información ha sido utilizada para la elaboración de cartas de susceptibilidad de inundaciones causadas por desbordamientos de ríos y activación de líneas de quebradas y remoción en masa -en sus diferentes manifestaciones- (aluviones, derrumbes de rocas, deslizamiento de tierra).

FIGURA Nº 1-1 Ubicación del área de estudio



Fuente: Elaboración Propia

1.3 Alcance y limitaciones

Para esta etapa del trabajo se realizó una compilación de referencias bibliográficas, antecedentes históricos, revisión de fotografías aéreas y la evaluación de los distintos factores condicionantes para zonificar las áreas susceptibles a ser afectadas por un peligro geológico, a una escala 1:5.000 (considerando que la gran mayoría de la información geológica está a una escala mayor a 1:1.000.000). Se debe destacar que los resultados de este trabajo no deberían ser utilizados a una escala más detallada que la de referencia, ya que esto podría llevar a errores en la planificación territorial.

Por otro lado, no se llevo a cabo ningún análisis riguroso de períodos de retorno (**peligrosidad o amenaza**) o de consideraciones socio-económicas (**riesgo**), por lo que los mapas entregados corresponden a mapas de susceptibilidad y de factores condicionantes.

El resultado de este estudio corresponde a mapas de factores condicionantes, principalmente morfológicos y geológicos y mapas inventarios. A partir del análisis de los anteriores, se generaron mapas de susceptibilidad para cada uno de los peligros geológicos reconocidos en la zona a escala 1:5.000.

1.4 Marco Jurídico

La Ordenanza General de Urbanismo y Construcción (OGUC), en su apartado 2.1.17 “Disposiciones complementarias” indica que: “En los planes reguladores podrán definirse áreas restringidas al desarrollo urbano, por constituir un riesgo potencial para los asentamientos humanos. Dichas áreas, se denominarán “zonas no edificables” o bien, “áreas de riesgo”, según sea el caso, como se indica a continuación:

Por “zonas no edificables”, se entenderán aquéllas que por su especial naturaleza y ubicación no son susceptibles de edificación, en virtud de lo preceptuado en el inciso primero del artículo 60° de la Ley General de Urbanismo y Construcciones. En estas áreas sólo se aceptará la ubicación de actividades transitorias.

Por “áreas de riesgo”, se entenderán aquellos territorios en los cuales, previo estudio fundado, se limite determinado tipo de construcciones por razones de seguridad contra desastres naturales u otros semejantes, que requieran para su utilización la incorporación de obras de ingeniería o de otra índole, suficientes para subsanar o mitigar tales efectos. En el marco de este informe, “áreas de riesgo” son definidas como las zonas susceptibles a ser afectadas por un peligro geológico.

De acuerdo a la OGUC, las “áreas de riesgo” se determinarán en base a las siguientes características:

1. Zonas inundables o potencialmente inundables, debido entre otras causas a maremotos o tsunamis, a la proximidad de lagos, ríos, esteros, quebradas, cursos de agua no canalizados, napas freáticas o pantanos.

De acuerdo a las definiciones utilizadas en este informe, corresponde a los peligros geológicos de inundación, ya sea continental o costera. Este tópico que se explica conceptualmente en el capítulo 3.2.1 “Inundaciones Terrestres y Litorales”, y el diagnóstico de estos peligros en el área de estudio es presentada en los capítulos 5.3 “Inundaciones Terrestres” y 6.2.1 “Peligro de Inundaciones Terrestres y Flujos de Detritos o Barro”.

2. Zonas propensas a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas.

Corresponde a los peligros geológicos de remociones en masa (caída de bloques y flujos de barro y detritos) y los procesos litorales de erosión acentuada. Estos se explican conceptualmente en el capítulo 3.2.2 “Procesos de Remoción en Masa”. El diagnóstico de estos peligros en el área de estudio se presenta en el capítulo 6.2.2 “Peligros de Remociones en Masa”

3. Zonas con riesgo de ser afectadas por actividad volcánica, ríos de lava o fallas geológicas.

Dentro de este apartado definido por la OGUC se analizan conceptualmente los procesos endógenos internos de la tierra, descritos en los capítulos 3.1.1 “Sismicidad” y 3.1.2 “Volcanismo”. El diagnóstico y zonificación de estos peligros en el área de estudio se presenta en los capítulos 5.1 “Volcanismo”, y 6.1 “Peligros No Zonificables”. Para autorizar proyectos a emplazarse en áreas de riesgo, se requerirá que se acompañe a la respectiva solicitud de permiso de edificación un estudio fundado, elaborado por profesional especialista y aprobado por el organismo competente, que determine las acciones que deberán ejecutarse para su utilización, incluida la Evaluación de Impacto Ambiental correspondiente conforme a la Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, cuando corresponda.

1.5 Aspectos Metodológicos

La metodología a seguir durante esta etapa del proyecto se resume en las siguientes tareas:

1. Elaboración de una línea de base geológica y geomorfológica: El objetivo de este punto es identificar los distintos depósitos sedimentarios producto de procesos de remoción en masa e inundaciones, esto es, depósitos aluviales activos e inactivos, depósitos fluviales activos e inactivos, depósitos coluviales y las zonas de generación de coluvios.
2. Visitas técnicas de terreno al área de estudio.
3. Catastro de Peligros Geológicos Históricos: En esta tarea se recopilan los distintos peligros geológicos que han afectado los sectores urbanos de la comuna de Los Muermos, con la finalidad de identificarlos y ordenarlos cronológicamente.
4. Catastro de Factores Condicionantes: se reúne información acerca de los factores intrínsecos (propios del medio físico) que condicionan la ocurrencia de un peligro geológico.
5. Estudio de Factores Desencadenantes: se reunió información histórica acerca de los factores gatillantes de un peligro geológico dado, con el objetivo de estimar la recurrencia de un evento a través de métodos estadísticos.

A continuación se detalla la metodología utilizada para la elaboración de cada uno de los puntos nombrados previamente.

1.5.1 Elaboración de Línea Base geológica y geomorfológica

Las caracterizaciones geológica y geomorfológica se realizaron simultáneamente. Para ello se utilizaron como base los mapas geológicos SERNAGEOMIN (2003) a escala 1:1.000.000 y SERNAGEOMIN-GORE Los Lagos (2008). Toda esta información se refinó a una escala adecuada a partir de los antecedentes provistos para esta etapa (interpretación de fotografías aéreas e imágenes satelitales). Los mapas geológicos y

geomorfológicos producidos para las localidades de estudio se ajustaron, a partir de la topografía local, a una escala 1:5.000 para cada localidad.

Para la caracterización geológica y geomorfológica se realizó una interpretación de fotografías aéreas e imágenes satélites, lo cual permitió delimitar los principales contactos entre el basamento rocoso y los depósitos no consolidados activos e inactivos, tales como depósitos aluviales, depósitos fluviales y deltaicos, depósitos coluviales, depósitos litorales, depósitos glaciares y niveles aterrizados. Además se identificaron los principales cauces, sus llanuras de inundación y niveles de terrazas fluviales.

Simultáneamente, se construyó un Modelo de Elevación Digital (DEM, por sus siglas en inglés). El DEM corresponde a una matriz que contiene la información topográfica básica (elevación) que permitió estimar los parámetros morfométricos. Los parámetros morfométricos analizados son: cartas de pendiente, exposición de ladera, curvatura y relieve sombreado. Estos mapas fueron utilizados como apoyo para la identificación de los principales depósitos no consolidados y serán considerados un factor condicionante para la elaboración de mapas de susceptibilidad.

Para la generación del DEM y las cartas morfométricas asociadas se utilizó el Modelo de Elevación ASTER GDEM¹, con un tamaño de celda de 23 metros. Como su nombre lo indica, estos datos topográficos provienen de los datos tomados por el sensor japonés ASTER (Advance Space Borne Thermal Emission and Reflection Radiometer), puesto en órbita por la NASA en el año 1999. Desde el año 2009, está disponible gratuitamente entre los 83° N y 83° S (un 99% de la superficie terrestre). Este modelo genera celdas de 23x23 metros y fue generado a partir de la correlación estereoscópica de imágenes.

1.5.2 Visita técnica al área de estudio

Durante esta etapa, se realizó una visita técnica en el área de estudio, con énfasis en los siguientes objetivos:

1. Complementar y afinar la cartografía geológica existente, con particular detalle de las unidades geológicas más recientes.
2. Identificar los peligros geológicos reconocidos en el área.
3. Complementar y validar la información obtenida en la recopilación bibliográfica
4. Revisar la interpretación de fotografías aéreas e imágenes satelitales realizada.

La salida a terreno se realizó el 10 de enero de 2012, con el objetivo de identificar los principales problemas que afectan al área de estudio e identificar las principales unidades sedimentarias activas. Además, se comprobó la ubicación de terrazas fluviales, escarpes y posibles procesos de remoción en masa identificados a partir de la interpretación de fotografías aéreas e imágenes satelitales.

1.5.3 Inventario de Peligros Geológicos

El inventario de peligros geológicos se realiza en base a una recopilación de antecedentes bibliográficos y registros históricos. Toda esta información es complementada con el trabajo realizado en terreno y con la información recopilada en entrevistas realizadas a los habitantes de las localidades en estudio.

1.5.3.1 Revisión histórica y bibliográfica

¹Los datos ASTERGDEM fueron descargados desde: <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>

Se realiza una revisión metódica de los eventos geológicos que eventualmente signifiquen un peligro para la zona de estudio, estos son:

1. Actividad volcánica
2. Actividad sísmica
3. Inundaciones
4. Remociones en masa.

Esto con el objetivo de cuantificar y calificar la distribución temporal y espacial de dichos sucesos y así, con el factor histórico, acotar mejor las probabilidades de la ocurrencia de un suceso en un intervalo de tiempo y espacio determinados.

Para dicho efecto se revisan los antecedentes históricos de publicaciones científicas y libros, tales como por ejemplo Urrutia & Lanza (1993), González-Ferrán (1995), publicaciones del SERNAGEOMIN, entre otros., y se realizaron entrevistas a la gente que vive en la zona.

La generación del inventario de eventos sísmicos se realizó en base a recopilaciones históricas y de publicaciones científicas como Nishenko (1985); Comte, et al. (1986); Comte y Pardo (1991) Comte, et al. (1991); Lara y Rauld (2003); Urrutia y Lanza (1993). La base de datos de sismos utilizada para representar los sismos históricos de la región es del National Earthquake Information Center (NEIC) del United States Geological Survey (USGS)². Esta base de datos corresponde a los sismos registrados en todo el mundo con los instrumentos de dicha institución, e instituciones asociadas, a partir del año 1973. El error asociado a dichos datos es del orden de 50 km, pero dada la cantidad de datos y la extensión temporal de su registro resulta útil para representar la sismicidad a escala regional.

Para los eventos volcánicos se revisaron las fechas de registro de actividad y catastros de centros volcánicos presentados en Urrutia & Lanza (1993), González-Ferrán (1995), SERNAGEOMIN (2003) y Petit-Breuilh (1995).

Con respecto a los eventos de remoción en masa, no se encontraron registros en la bibliografía revisada, por lo tanto esta información deberá adquirirse a través de entrevistas a personas lugareñas y con análisis de imágenes satelitales y fotografías aéreas.

1.5.3.2 Análisis e interpretación de fotografías aéreas e imágenes satelitales

Con el fin de identificar evidencias de peligros geológicos declarados, es decir peligros geológicos que en el pasado ya se han manifestado en el área de estudio, se recopilaron fotografías aéreas e imágenes satelitales. Además, a partir de las imágenes recopiladas, se realizó el mapeo geológico y geomorfológico, donde se han identificado a una escala adecuada una serie de rasgos, tales como depósitos y quebradas principales del área de estudio. Posteriormente, estos eventos identificados fueron verificados en la visita a terreno. Estos elementos evidencian que el área de estudio ha sido afectada por procesos de glaciaciones y remoción en masa en el pasado, y además, permiten deducir algunas características y factores desencadenantes de estos fenómenos, información que será utilizada para la estimación y modelado del alcance de estos procesos.

² Disponible en línea en: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/>

1.5.3.3 Catastro de Factores Condicionantes y Desencadenantes

Con el objetivo de determinar las áreas más susceptibles, se ha recopilado una serie de mapas de factores considerados condicionantes para la ocurrencia de un peligro geológico dado. Dentro de estos se encuentran:

1. Elevación, pendiente, curvatura dirección de drenaje de la ladera (exposición). Fueron elaborados a partir del DEM generado con las curvas de nivel cada 1 metro.
2. Litología: Corresponden a los distintos mapas geológicos recopilados, los que fueron aumentados a una escala mayor en este trabajo. Corresponden al mapa geológico de Chile (SERNAGEOMIN, 2003) y al levantamiento hidrogeológico de (SERNAGEOMIN-GORE, 2008) modificados en este trabajo.

Con respecto a los factores desencadenantes, se catastraron los registros sísmicos que se han reportado en el área de estudio.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Peligros Geológicos en Chile

Los procesos geodinámicos producen modificaciones de diversas magnitudes en la superficie terrestre que constituyen peligros geológicos que afectan de forma directa o indirecta las actividades humanas. La **previsión** de estos procesos que consiste en la identificación de áreas con mayor posibilidad de ser afectadas por eventos geológicos peligrosos, es imprescindible para adoptar medidas de **prevención** y reducir su impacto sobre las edificaciones y la población (Ogura & Soares-Macedo, 2000). Asociados a los peligros geológicos se reconocen cuatro conceptos principales: susceptibilidad, vulnerabilidad, amenaza o peligrosidad (hazard) y riesgo (risk).

La **susceptibilidad** se define como la **posibilidad** de que una zona sea afectada por un determinado proceso, y se expresa a través de distintos grados cualitativos y relativos. Depende directamente de los factores que controlan o condicionan la ocurrencia de los procesos, que pueden ser intrínsecos de los materiales geológicos o controlados por un factor externo (precipitación, sismos, etc.). Para la construcción de mapas de susceptibilidad se utilizan los mapas de inventario, correspondientes a áreas que sufren o han sufrido determinados procesos, y mapas de factores condicionantes que favorecen o entorpecen el desarrollo de estos procesos. Además, los mapas de susceptibilidad apuntan a cubrir el peor escenario posible en el área de estudio.

Los distintos **elementos expuestos** (personas, infraestructura, actividades económicas) en zonas susceptibles son agrupados dentro del concepto de **vulnerabilidad**, que se define como el grado de daños o pérdidas potenciales como consecuencia de un fenómeno de una intensidad determinada.

El concepto de **amenaza** o **peligrosidad** (hazard*) corresponde a la **probabilidad de ocurrencia** de un proceso, con un nivel de intensidad determinado dentro de cierto período de tiempo y en un área específica. La estimación de la amenaza o peligrosidad implica necesariamente una consideración de la variable temporal, es decir, el período de recurrencia de un evento. Por otro lado, la amenaza para períodos de retorno infinitos tiende a ser similar que la susceptibilidad. Por lo anterior, y en consideración de que no se tienen datos suficientes para estimar períodos de retorno, se utilizarán mapas de susceptibilidad, que consideran solo las variables intrínsecas del material, para la zonificación de peligros geológicos.

Por otro lado, el concepto de **riesgo** (risk) se define como las potenciales pérdidas económicas o de vidas (directas e indirectas) producto de la ocurrencia de un determinado fenómeno, en función de la amenaza determinada para una zona. En general el riesgo (R) se define como:

$$R = A \times C$$

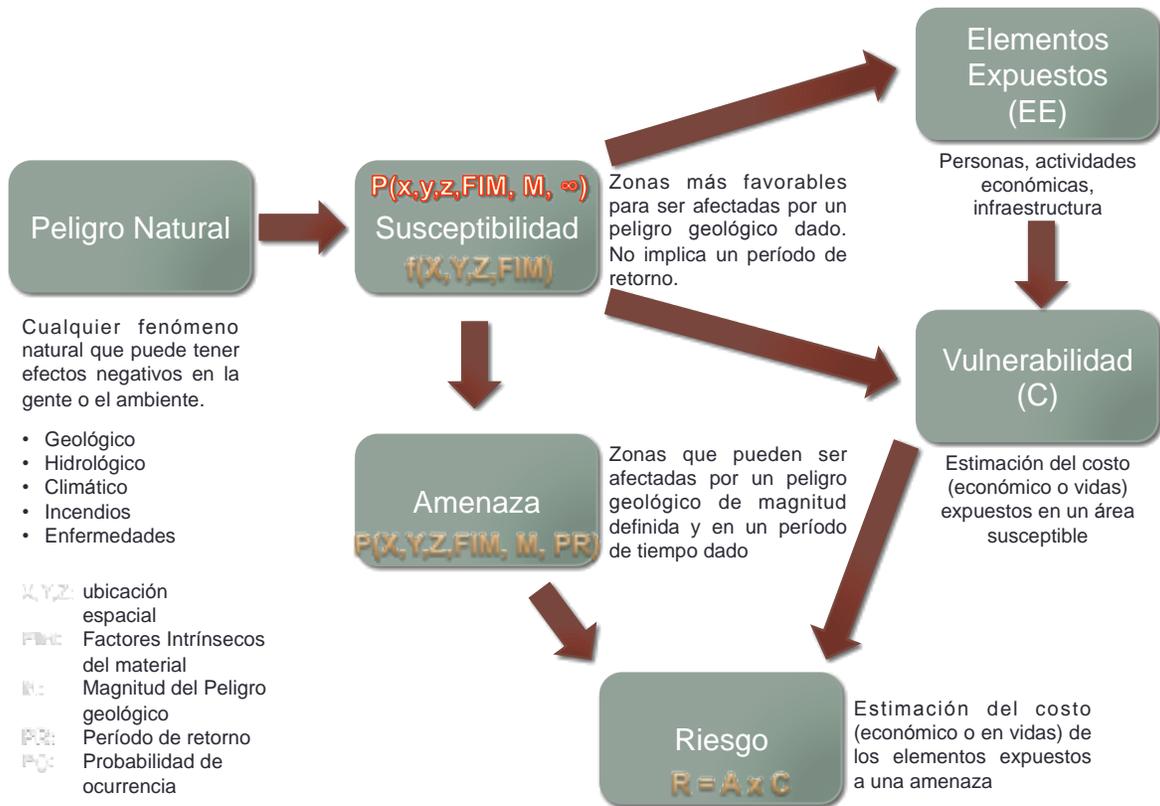
Donde A corresponde a la amenaza o peligrosidad (probabilidad de que ocurra un evento dado en un período de tiempo) y C corresponde al costo (ya sea en vidas, valoración económica, metros de caminos, etc.). La FIGURA N° 2-1 muestra la relación entre el conocimiento y la estimación de la susceptibilidad, amenaza y riesgo.

* La traducción literal corresponde a peligro, pero de acuerdo a la ONEMI y al proyecto Multinacional de GeocienciasAndino (MAP-GAC) para evitar confusiones se utiliza Amenaza o Peligrosidad

En resumen, los peligros geológicos pueden analizarse desde el punto de vista de las condiciones intrínsecas del material (estudios de susceptibilidad o determinísticos) y desde el punto de vista de los factores desencadenantes de un fenómeno (estudios de amenaza o probabilísticos). Considerando que para un estudio probabilístico es necesario contar con set de datos históricos de los procesos desencadenantes, los que normalmente no se encuentran registrados de manera adecuada, y que para períodos de retornos infinitos los mapas de amenaza tienden a ser similares a los mapas susceptibilidad, se considera que los mapas de susceptibilidad corresponden al escenario más conservador y a ser aplicado en la Planificación Territorial.

Finalmente, la **reducción y mitigación** de los riesgos vinculados a los diversos peligros geológicos presenta igual o mayor importancia que el manejo de las emergencias y la respuesta posterior al evento catastrófico. El desarrollo sustentable de la urbanización está directamente asociado a la reducción y mitigación de estos riesgos. La generación de conciencia a partir del conocimiento de los peligros y riesgos geológicos es fundamental para reducir y mitigar las consecuencias de estos eventos sobre la población (UNIS/ISDRR, 2004).

FIGURA Nº 2-1 Etapas de la evaluación de un evento geológico peligroso



Fuente: Elaboración propia basado en Varnes (1984).

3. PELIGROS GEOLÓGICOS A SER ESTUDIADOS

En este capítulo se detallan los peligros geológicos que potencialmente podrían afectar o han afectado al área de estudio, constituyendo un riesgo de catástrofe permanente o potencial, amenazando el emplazamiento de población.

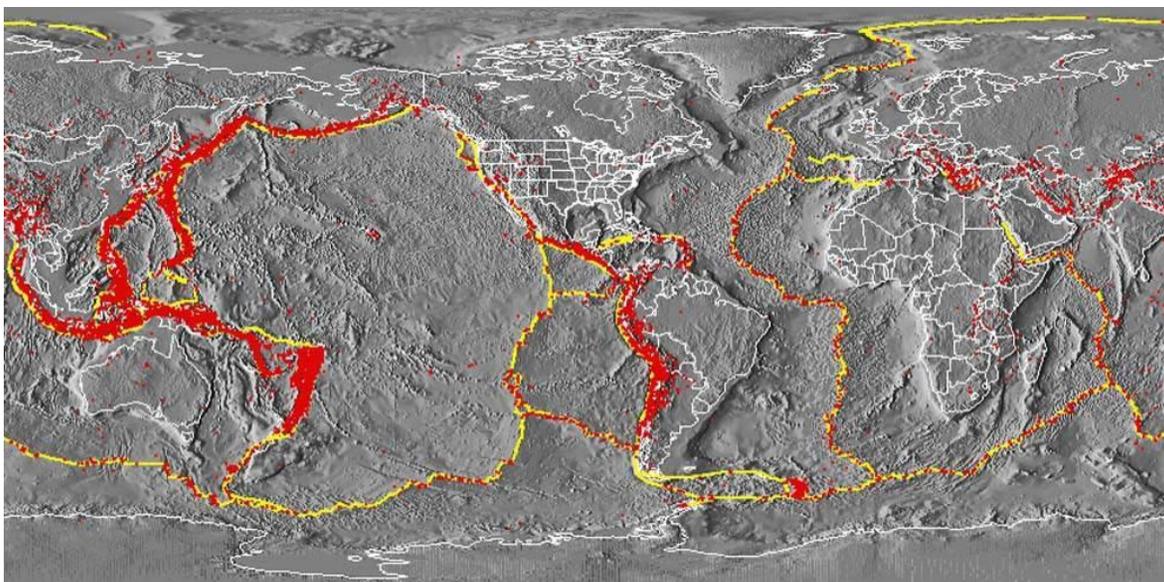
Para cada peligro, se describe en qué consiste, cuáles son sus factores condicionantes, y los principales efectos para la población y sus actividades. El análisis se realiza dividiendo los peligros geológicos en dos grupos, procesos internos o endógenos de la tierra (peligro sísmico y volcánico), y los procesos externos o exógenos (remociones en masa, inundaciones).

3.1 Procesos Internos o Endógenos de la Tierra

3.1.1 *Sismicidad*

La costa Oeste de Sudamérica está delineada por el borde occidental de la placa Sudamericana y se caracteriza por una intensa sismicidad debido a su convergencia con la placa de Nazca. En planta se aprecia una banda sísmica activa muy angosta (100-150 km) y de profundidad variable (~5-200 km) entre el cordón montañoso de los Andes y la fosa Perú-Chile. La FIGURA N° 3-1 ilustra la sismicidad mundial que resalta los márgenes de las placas tectónicas y muestra además, cómo Chile se encuentra en un ambiente de gran producción sísmica.

FIGURA N° 3-1 Sismicidad mundial entre los años 1980 y 1990, se representan en puntos rojos los epicentros con magnitud >5. Nótese como la sismicidad “ilumina” los límites de las placas tectónicas, dibujados en amarillo

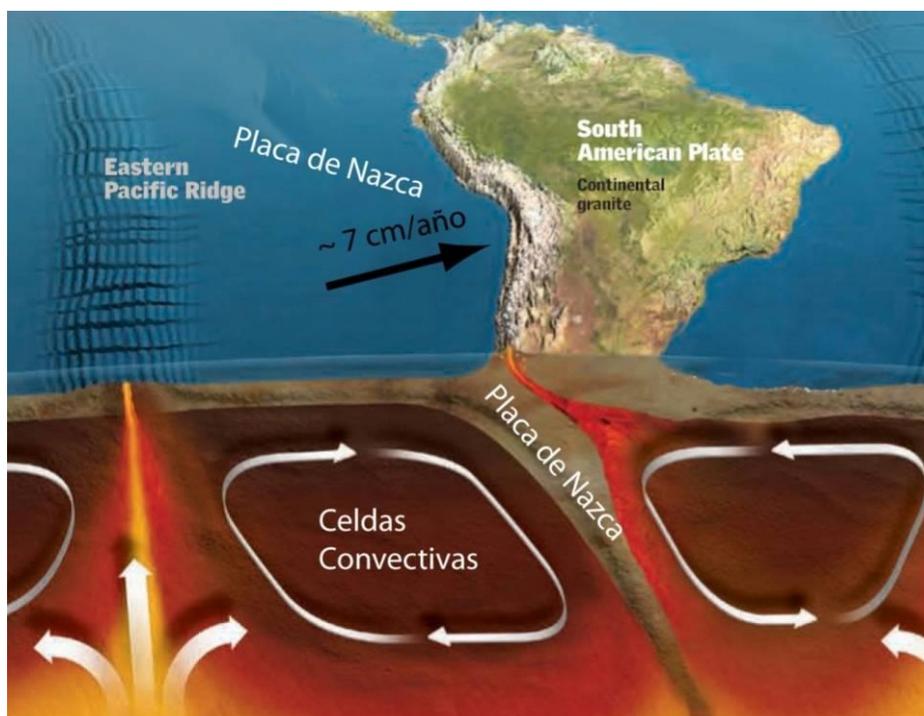


Fuente: Western Washington University (2011)

El margen de subducción donde se ubica Chile está caracterizado por una convergencia del orden de 8 cm/año (DeMets, et al., 1994). Una serie de fuerzas actúan sobre la Placa de Nazca, como por ejemplo el flujo convectivo de material del manto, que “mueve” a la placa en dirección al este generando la convergencia,

o el mismo peso de la placa oceánica que “tira hacia abajo” esta placa, favoreciendo la subducción (FIGURA N° 3-2). Debido a sus distintas composiciones, la placa oceánica que es comparativamente más densa (de composición basáltica) tiende a introducirse bajo la corteza continental menos densa (de composición granítica). Las fuerzas que actúan sobre la interface entre ambas placas así como las de interacción entre las placas y el manto generan el llamado acoplamiento sísmico interplaca, el que puede entenderse como la resistencia al deslizamiento en la zona de contacto entre ambas. A mayor acoplamiento interplaca la capacidad de generar terremotos de gran magnitud aumenta (Scholz, 1990).

FIGURA N° 3-2 Contexto geodinámico y margen de subducción de Chile



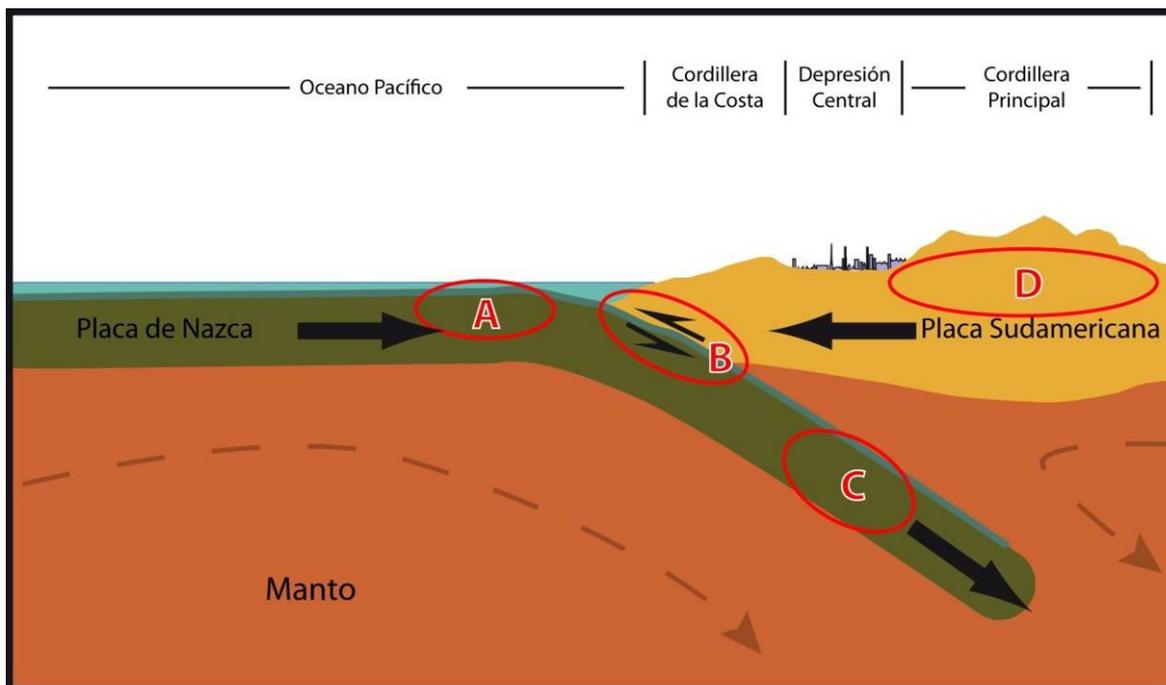
Fuente: Modificado de Enciclopedia Británica (2008)

El sistema de subducción, además de acumular energía que se libera por sismos de interplaca, genera campos de esfuerzos en la placa continental, en la oceánica y en la zona de acople entre ambas. El método para descargar la energía acumulada es a través de diferentes tipos de sismos, ejemplificados en la FIGURA N° 3-3, que corresponde a:

1. Zona A: Sismos “Costa afuera”, que se producen por los esfuerzos extensivos por abombamiento en la placa subductante antes de la zona de contacto. A pesar de llegar a tener magnitudes cercanas a $M_w = 6$, prácticamente no causan efectos significativos en áreas pobladas debido a su ocurrencia en zonas mar adentro.
2. Zona B: Sismos asociados al contacto interplaca, como los ocurridos en Antofagasta 1995, Chile Central 1985, Mejillones 2005 y Constitución-Concepción en el 2010. Estos son producto de la liberación de energía acumulada por la convergencia de placas.
3. Zona C: Sismos intraplaca de profundidad intermedia, como los sismos de Punitaqui 1997, Copiapó 2002, Calama 1950, Tarapacá 2005 y Chillán 1939. Se producen por el fracturamiento tensional de la placa de Nazca (la placa se quiebra por su propio peso).

4. Zona D: Sismos superficiales intraplaca, cómo los sismos de Las Melosas en 1958, Aroma en 2001, Curicó en 2004 y Aysén, 2007. Son producto del esfuerzo intraplaca inducido por la subducción, que a la vez contribuye a la generación de relieve. En general, los sismos superficiales intraplaca se encuentran asociados a fallas superficiales que pueden tener movimientos normales, inversos y de rumbo, que responden a campos de esfuerzos compresivos o extensivos.

FIGURA N° 3-3 Tipos de sismos que ocurren en un margen de subducción (explicación en el texto)

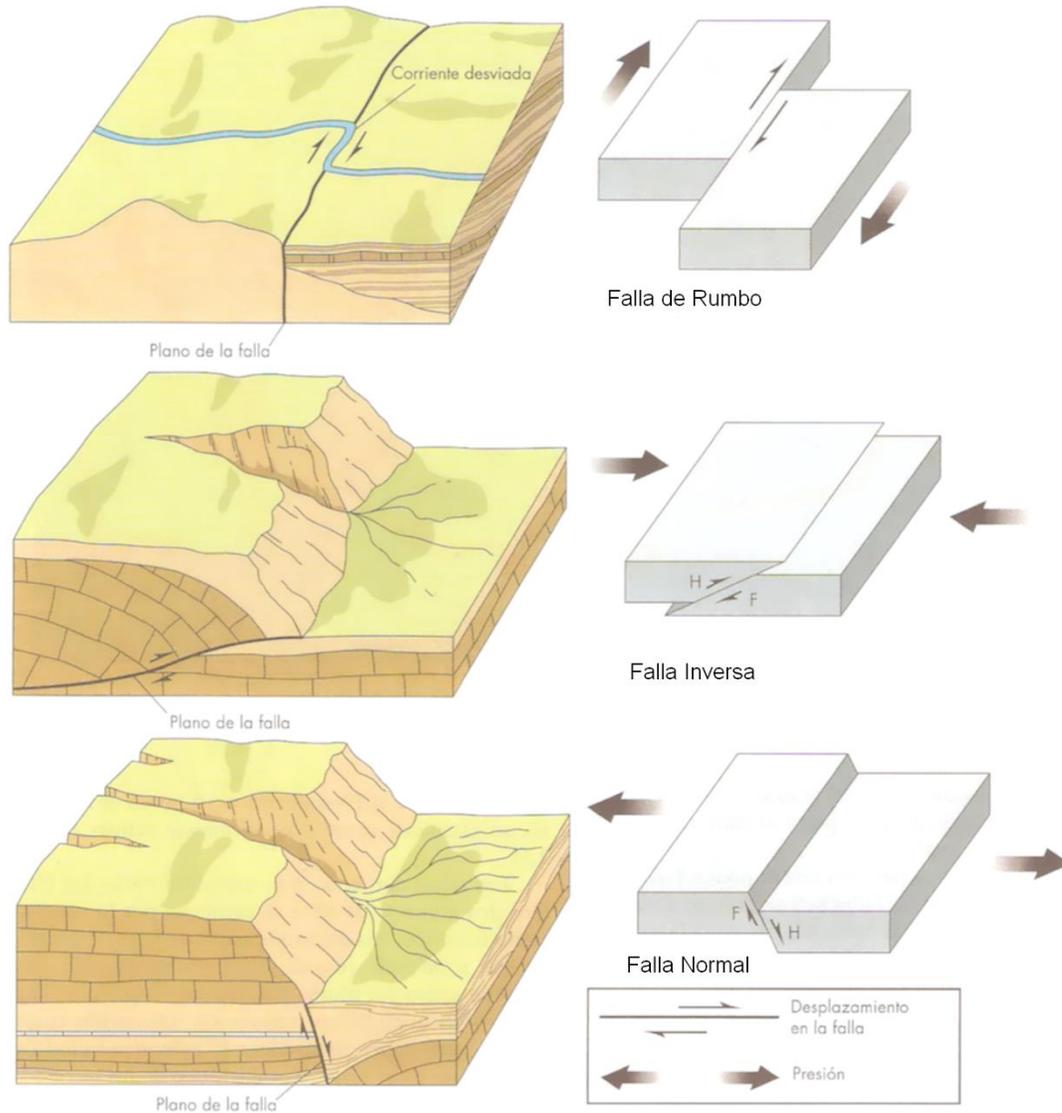


FUENTE: Elaboración propia

Independientemente de la ubicación particular de uno u otro sismo, todos ellos corresponden a un desplazamiento violento paralelo al plano de falla que libera la energía acumulada en la interfaz. La energía que se acumula producto de la convergencia de placas, tanto en el contacto interplaca como en la corteza, en algún momento supera la resistencia de las rocas. En dicho instante se produce una ruptura que se propaga a través de un plano de falla, el que, de acuerdo a su geometría, generará diferentes tipos de movimientos (FIGURA N° 3-4). A su vez, esta ruptura conlleva una liberación de energía que se propaga por medio de ondas sísmicas.

Las ondas que transmiten la energía sísmica se agrupan en dos tipos principales: ondas de cuerpo y ondas de superficie. Las primeras se dividen en ondas P (compresivas) y ondas S (ondas de corte o de cizalle), mientras que las segundas se dividen en ondas Rayleigh y Love (FIGURA N° 3-5). En las ondas P el movimiento de partículas se produce en forma paralela al de la propagación de la onda y en las ondas S es en dirección perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Las ondas Rayleigh tienen un movimiento oscilatorio elíptico y las ondas Love tienen un movimiento oscilatorio horizontal. Con respecto a su impacto en superficie, debido a que las ondas S transportan la mayor cantidad de energía y a que las ondas superficiales tienden a tener movimientos de mayor frecuencia, ambos tipos corresponden a los de carácter más destructivo del movimiento sísmico. Aun así, a medida que las ondas se alejan de la fuente van perdiendo o disipando energía, siendo cada vez menos destructivas, fenómeno que se conoce como atenuación.

FIGURA N° 3-4 Tipos de Falla y esfuerzos asociados



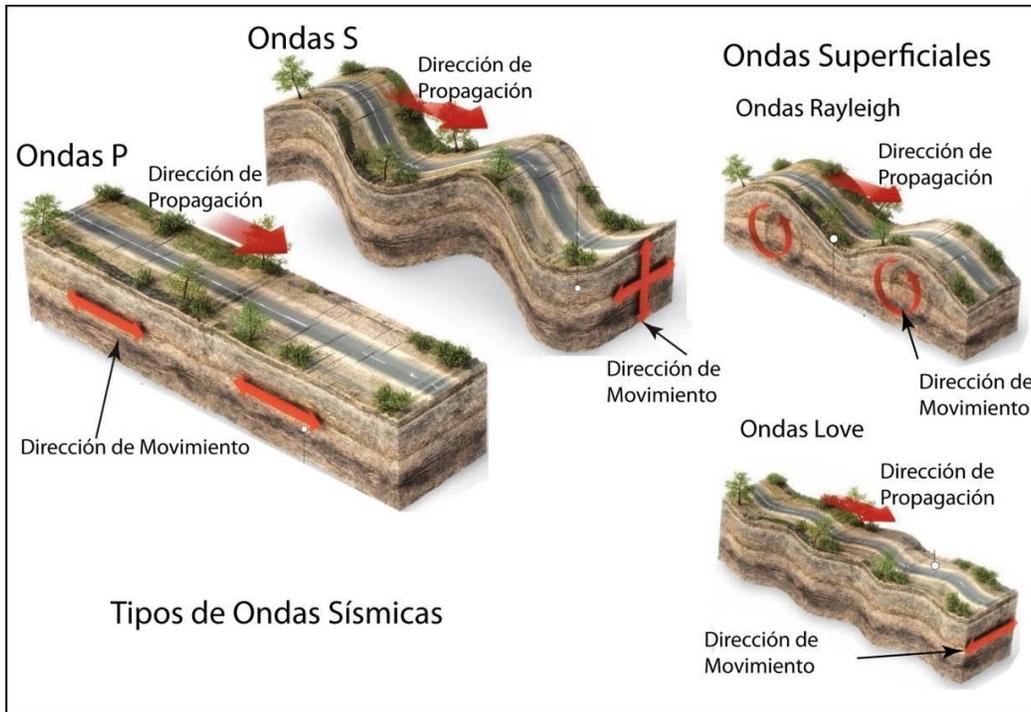
Fuente: Keller y Blodgett (2004)

Para medir los sismos se utilizan, principalmente, dos escalas: *magnitud* e *intensidad*. La *magnitud* es una medida única y objetiva, que normalmente se relaciona con la escala de RICHTER (M_S). Actualmente para grandes sismos se utiliza la escala de magnitud de momento (M_W) que se calcula a partir del tamaño de la zona de ruptura y el desplazamiento medido para un sismo ocurrido, y da cuenta de la energía total liberada por el evento. La *intensidad* es una medida subjetiva del impacto de un sismo sobre la población, en términos de percepción humana del evento y sus efectos en la infraestructura. Este parámetro se mide en la escala de MERCALLI-CANCANI, denominada también como Modificada de Mercalli (M.M.).

Finalmente, debe destacarse el llamado “efecto sitio”, que indica un condicionamiento de carácter local bajo el cual para un mismo terremoto y dependiendo del tipo de terreno donde uno se encuentra ubicado, las ondas sísmicas pueden amplificarse durante el desarrollo del terremoto (FIGURA N° 3-6). El principal efecto asociado a la ocurrencia de sismos son fuertes movimientos del terreno, que originan un peligro directo sobre las estructuras y sobre las personas, debido a las fuertes aceleraciones generadas por las ondas sísmicas. Sumado a lo anterior, la ocurrencia de estos fenómenos es generalmente sin previo aviso, por lo que la única

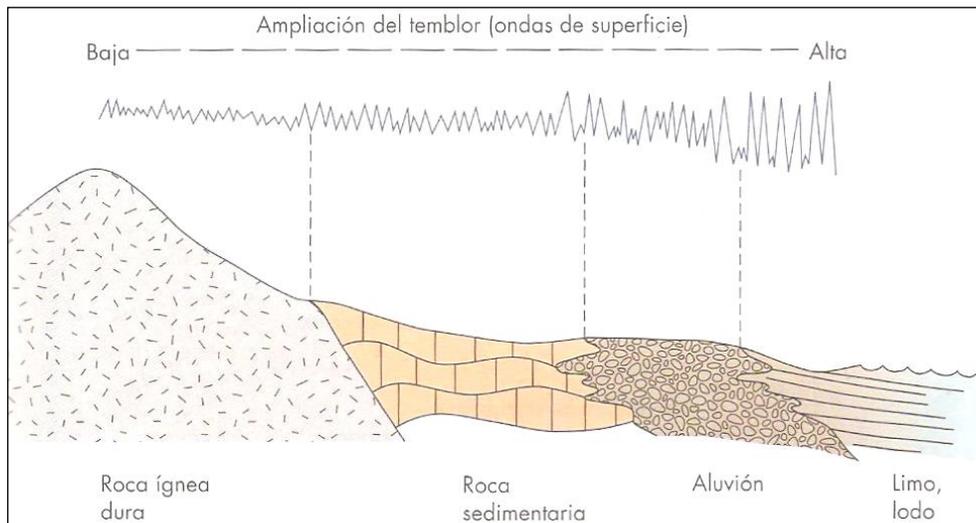
manera de mitigar el riesgo es con campañas de educación y estrictas normas de construcción. Muchos de estos fenómenos son acompañados por asentamientos en las superficies, normalmente irregulares, dañando construcciones, infraestructura y cañerías. Esto implica en una alta vulnerabilidad estructural, económica y social. Particularmente con respecto a esta última se deben mencionar las potenciales pérdidas de vidas humanas y heridos por el derrumbe de estructuras, además de la vulnerabilidad a enfermedades gastrointestinales y epidemias por el colapso de los sistemas sanitarios y de conectividad, entre los innumerable efectos adversos para la sociedad que provocan este tipo de fenómenos.

FIGURA N° 3-5 Tipos de ondas sísmicas



Fuente: Modificado de Enciclopedia Británica (2008)

FIGURA N° 3-6 Amplificación de la vibración generada por un terremoto



Fuente: Keller y Blodgett (2004)

Más allá de los efectos directos mencionados anteriormente, los sismos pueden también inducir la ocurrencia de otros fenómenos, como es el caso de procesos de remoción en masa (caídas de bloques y deslizamientos), maremotos y licuefacción.

Los deslizamientos y derrumbes se dan en diversos tipos de suelos y bajo variadas condiciones sismotectónicas, incluso se han detectado en sismos de grado $M_w = 4.0$. La cantidad y severidad de estos están en directa relación con la cercanía al epicentro y la magnitud del evento causante (Keeper, 1984); (Sepúlveda, et al., 2005); (Sepúlveda, et al., 2010). Sea cual sea su origen, los deslizamientos y derrumbes están asociados principalmente a tres factores: las pendientes del terreno, la resistencia mecánica de los materiales involucrados y antecedentes de eventos anteriores (Centeno, et al., 1994); (Sancho, 1997). Para más detalle acerca de estos procesos ver el capítulo 3.2.2 “Procesos de Remoción en Masa”.

Los maremotos o tsunamis corresponden a una ola o un grupo de olas de gran energía y tamaño que se producen cuando algún fenómeno extraordinario desplaza verticalmente una gran masa de agua y en aproximadamente un 90% de los casos, estos fenómenos son provocados por terremotos. La energía de un maremoto depende de su altura (amplitud de la onda) y de su velocidad, y estará asociada a la magnitud del evento que lo generó. Para más detalle acerca de estos procesos ver la sección

Otro proceso que se asocia comúnmente a la actividad sísmica es la licuefacción del terreno, que corresponde al fenómeno donde un material sólido saturado en agua se comporta como líquido a causa de la intensa vibración. Las ondas sísmicas hacen aumentar la presión de agua presente en el sedimento, de forma que los granos de arena o limo pierden el contacto entre ellos causando una pérdida de resistencia del sólido y permitiendo que el depósito pueda fluir. Bajo estas condiciones, el suelo puede perder su capacidad de soporte de estructuras, producir deslizamientos (incluso en superficies con muy bajas pendientes) y formar volcanes de arena. Muchos de estos fenómenos son acompañados por asentamientos en las superficies, normalmente irregulares, dañando construcciones, infraestructura y cañerías.

Para la ocurrencia de licuefacción se requiere de tres factores (Martin & Lew, 1999):

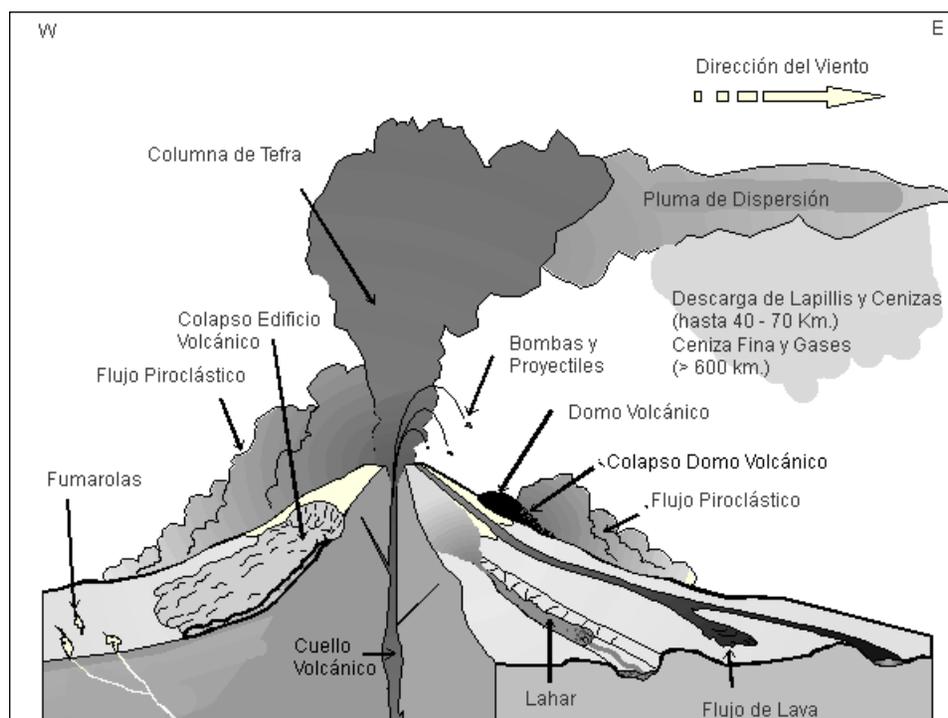
1. Depósitos o suelos, granulares poco consolidados (suelos y no cementados) de tamaño fino a medio (limo a arena, aunque en algunos casos se ha presentado en arcillas y en gravas). Típicamente pueden ser rellenos artificiales, especialmente aquellos creados por relleno hidráulico (ej. puertos y tranques de relaves), depósitos eólicos (dunas), depósitos de playas o de cursos de agua lo suficientemente jóvenes para estar sueltos. Los suelos con partículas de diferentes tamaños son menos propensos a sufrir licuefacción, debido a que las partículas menores tienden a rellenar los espacios entre las mayores, reduciendo así la tendencia a densificación del suelo y evitando los efectos del aumento de presión de agua. También influye la forma de las partículas que conforman el suelo, siendo un depósito de partículas redondeadas más susceptible de sufrir licuefacción.
2. Saturación de los depósitos por aguas subterráneas, el agua debe rellenar los espacios entre los granos de limo o arena. Puede producirse en zonas donde el nivel de agua subterránea es somero como en desembocadura de cursos de agua, humedales, pantanos, vegas y zonas costeras.
3. Fuertes movimientos sísmicos, durante los cuales las ondas sísmicas aumentan la presión del agua contenida en los depósitos. Cabe destacar, que todo Chile, en especial desde la península de Taitao al norte, tiene el potencial de ser afectado por grandes terremotos.

3.1.2 Volcanismo

El peligro volcánico deriva de los procesos asociados a la erupción de un volcán. En Chile el volcanismo activo se distribuye a los largo de la Cordillera de los Andes, pero de forma discontinua. En la zona entre los 18° y 27°S y aquella al sur de los 33°S se ubica el volcanismo activo, mientras que entre los 27°-33°S está ausente. Los principales peligros asociados a una erupción volcánica se resumen en la FIGURA N° 3-7 y en el CUADRO N° 3-1.

La lluvia de ceniza y tefra se produce durante erupciones explosivas en las que una gran cantidad de material volcánico se inyecta en la atmósfera a gran altura, generando columnas de tefra, compuestas por piroclastos y gases. Estas columnas, ascienden velozmente alcanzando en pocos minutos alturas estratosféricas, siendo dispersadas por el viento y esparcidas las cenizas y piroclastos alrededor de una gran área. En caso de colapso de esta columna se producen flujos y oleadas piroclásticas que pueden alcanzar centenares de kilómetros, en función de la altura de la columna de tefra (energía potencial transformada en energía cinética) y la dirección del viento, generando grandes depósitos de ceniza y piroclastos incandescentes. Adicionalmente, es común que se produzca contaminación de aguas superficiales en todo el sector afectado por la caída de cenizas, así como también de los acuíferos en los alrededores del volcán por la inyección de aguas hidrotermales, además del envenenamiento por dispersión de gases tóxicos hacia la atmósfera.

FIGURA N° 3-7 Peligros volcánicos asociados a la erupción de un volcán



Fuente: Myers y Brantley (1995)

Los flujos de lava se producen cuando material magmático se desplaza aguas abajo del centro de emisión. El alcance que tendrán estos flujos está determinado por la tasa de efusión (emisión del centro volcánico), la pendiente del terreno sobre el cual la lava escurre y la viscosidad de la lava. Además, en las cercanías del centro de emisión se producen comúnmente temblores de magnitud inferior a 6 en la escala de Richter (Mw), pero a poca profundidad (entre 1 y 20 km), los que están asociados a intensidades mayores a VI en las cercanías del epicentro. Estos sismos provienen de diversos procesos, tales como ascenso del magma y

fracturamiento de la corteza, explosiones volcánicas y esfuerzos tectónicos compresivos y expansivos asociados al ciclo eruptivo (González-Ferrán, 1995).

Los procesos de remoción en masa asociados a una erupción volcánica se pueden clasificar en tres grandes grupos: lahares, colapso parcial o total del edificio volcánico y deslizamientos de laderas (González-Ferrán, 1995). Los lahares se producen por el brusco derretimiento de hielos y nieve durante una erupción volcánica. Corresponden a una mezcla de rocas fragmentadas preexistentes en las laderas de un volcán con materiales efusivos frescos y una gran cantidad de agua. Esta mezcla desciende aguas abajo a altas velocidades y de manera turbulenta, arrasando e incorporando a su flujo todo lo que encuentra en su trayecto (árboles, casas, etc.). Reportes históricos describen que las velocidades que alcanzan estos flujos van desde los 1,3 m/s hasta los 40 m/s, recorriendo decenas de kilómetros aguas abajo del valle, y en casos que la velocidad sea mayor a 150 Km/h pueden remontar barreras topográficas.

El colapso, total o parcial, del edificio volcánico puede producirse como consecuencia de una gran cantidad de energía liberada durante la erupción. Este proceso puede provocar tsunamis si ocurre en la cercanía de lagos o embalses, ya que puede producir el desplazamiento de volúmenes importantes de agua en pocos minutos generando olas destructivas de gran energía. Finalmente, asociado a la sismicidad producida por la erupción, pueden generarse deslizamientos de terreno en la cercanía del centro eruptivo, lo que puede dar paso a flujos de barro y/o detritos aguas abajo.

El impacto en la población y sus actividades es muy alto en las cercanías de los centros volcánicos, ya que los procesos asociados a una erupción (caída de ceniza, flujos piroclásticos, contaminación de aguas superficiales), pueden generar grandes catástrofes en la vida diaria e infraestructura de las comunidades. Los efectos más directos para la población, aunque la erupción se encuentre a distancia, son:

1. Pérdida de tierras cultivables
2. Colapso de techos y obras civiles
3. Pérdidas de vidas humanas y forraje
4. Contaminación de aguas y problemas sanitarios derivados.

Se debe destacar que, la duración de una catástrofe por actividad volcánica puede ser considerable dado que un ciclo eruptivo puede extenderse por meses o años (por ejemplo, el ciclo eruptivo del volcán Chaitén), y pueden afectar grandes áreas de terreno, como por ejemplo la erupción del volcán Quizapú en el año 1932, cuya pluma de ceniza alcanzó la ciudad de Johannesburgo, Sudáfrica o la erupción del Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle en curso (noviembre 2011), cuya pluma de ceniza dio la vuelta al mundo.

CUADRO N° 3-1 Peligros asociados al volcanismo

Peligro	Factores de Peligro	Tipo de Daño	Alcance	Condicionantes
<i>Lluvia de Tefra y Proyectiles Balísticos</i>	<i>Proyección de Bombas y Escorias Incandescentes</i>	Daños por impacto, incendios.	Alrededores del volcán (<10 km)	Tamaño de proyectiles. Mayor tamaño, menor alcance; menor tamaño, mayor alcance
	<i>Caída de Piroclastos y Dispersión de Cenizas</i>	Recubrimiento de cenizas, colapso de estructuras, daños a la agricultura, daños a instalaciones industriales y viviendas, problemas de tráfico aéreo, falta de visibilidad, contaminación de aguas.	Centenares de kilómetros	Dirección del viento
	<i>Flujos y Oleadas Piroclásticas</i>	Daños a estructuras, incendios, recubrimiento por cenizas.	Decenas a centenares de kilómetros	Dirección del viento y hacia donde colapsa la columna de tefra
	<i>Gases</i>	Envenenamiento, contaminación aire y agua.	Decenas a centenares de kilómetros	Dirección del viento y hacia donde colapsa la columna de tefra
	<i>Inyección de Aerosoles a la Estratósfera</i>	Impacto en el clima, efecto a largo plazo y/o a distancia.		Dirección del viento
<i>Lavas y Edificio Volcánico</i>	<i>Lavas y Domos</i>	Daño a estructuras, incendios, recubrimiento por lavas.	Alrededores del volcán (<10 km)	
	<i>Deformación del Terreno</i>	Fallas, daños a estructuras.	Alrededores del volcán (<10 km), puede ser de cientos de kilómetros	
	<i>Terremotos y Temblores Volcánicos</i>	Colapso del edificio volcánico, remociones en masa, daños a estructuras.	Alrededores del volcán (<10 km), puede ser de cientos de kilómetros	Geomorfología
<i>Remociones en masa</i>	<i>Lahares</i>	Daños a estructuras, arrastres de materiales, recubrimiento por barros.	Decenas a centenares de kilómetros	Red de drenaje
	<i>Colapso Parcial o Total del Edificio volcánico</i>	Daños estructuras, recubrimiento por detritos, avalanchas, tsunami inducido.	Alrededores del volcán (<10 km), puede ser de cientos de kilómetros	Geomorfología y cuerpos de agua cercanos
	<i>Deslizamiento de Laderas</i>	Arrastre de materiales, recubrimiento por detritos, daños a estructuras.	Alrededores del volcán (<10 km), puede ser de cientos de kilómetros	Geomorfología y cuerpos de agua cercanos
<i>Otros</i>	<i>Ondas de Choque</i>	Rotura de cristales y paneles.	Decenas de kilómetros	Dirección del viento y geomorfología
	<i>Variaciones en el Sistema Geotérmico de Acuíferos</i>	Cambios de temperatura y calidad del agua.	Alrededores del volcán (<10 km), puede ser de cientos de kilómetros	Red de drenaje

Fuente: Elaboración propia a partir de González-Ferrán (1995), Myers y Brantley (1995) y Sruoga (2002)

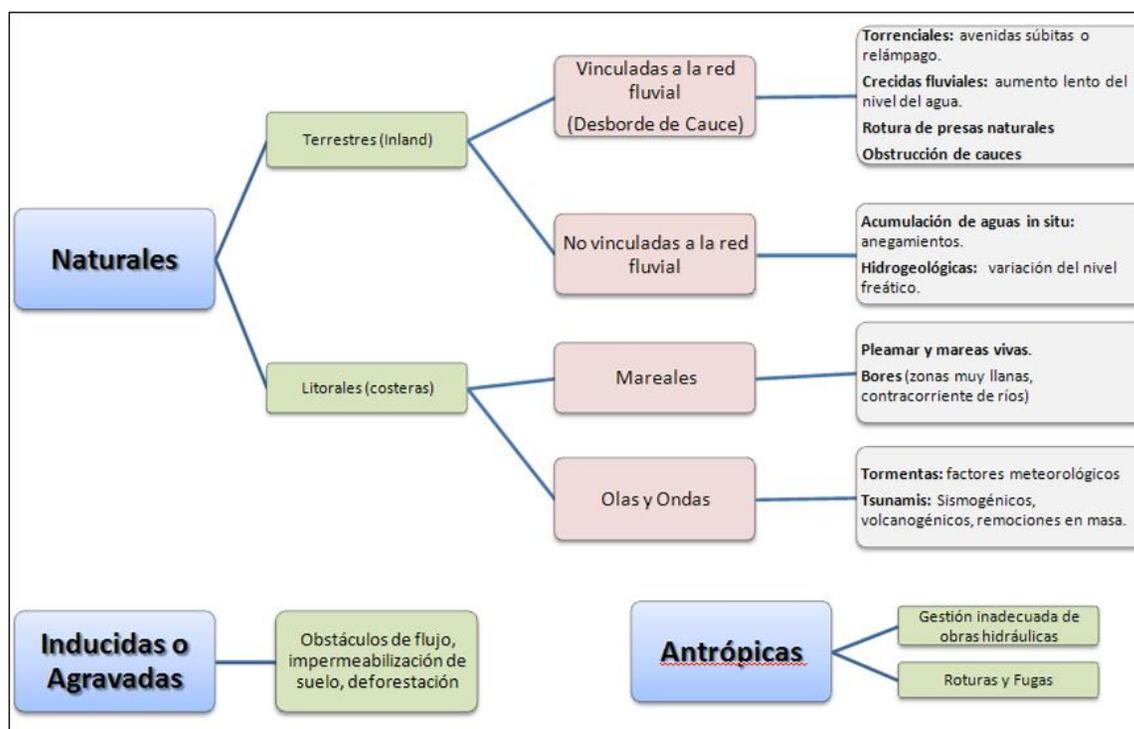
3.2 Procesos Exógenos o Externos de la Tierra

3.2.1 Inundaciones Terrestres y Litorales

Las inundaciones, sin considerar aquellas generadas por causas antrópicas, pueden ser de dos tipos (FIGURA N° 3-8): (1) terrestres, en el sentido de “tierra adentro”, en las que aguas dulces anegan territorios al interior de los continentes, y (2) litorales o costeras, en las que aguas marinas o lacustres-palustres invaden los sectores limítrofes con el dominio terrestre. Los procesos de inundación pueden originarse por varios factores, tales como lluvias intensas durante temporales, pero también pueden originarse por colapso o desbordamiento de represas y canales, marejadas en zonas costeras, o como afloramiento de aguas subterráneas en zonas pantanosas.

Cabe notar que existe una estrecha relación entre los fenómenos pluviométricos estacionales y los fenómenos de avalanchas, rodados, aluviones o erosiones. Los últimos se ven acentuados por el aumento de la capacidad de arrastre de material, por inundación y por desborde de cauces, todos ellos asociados a la activación de quebradas por lluvias ocasionales y que ponen en riesgo a la población en los alrededores.

FIGURA N° 3-8 Clasificación de los tipos de inundaciones



Fuente: Modificado de Díez-Herrero, et al. (2008)

A continuación se presenta una breve descripción de los distintos tipos de inundaciones.

3.2.1.1 Inundación por Desborde de Cauces

Como su nombre lo indica, estos tipos de fenómenos ocurren cuando ríos o esteros desbordan su cauce natural anegando las terrazas fluviales laterales o adyacentes, debido a la ocurrencia de caudales extremos. Estos fenómenos se producen generalmente debido a eventos de precipitaciones líquidas intensas y/o

prolongadas en el tiempo. Los valores que pueden alcanzar los caudales, así como el tamaño del cauce, dependen también de otros factores como del área de la cuenca correspondiente, su forma, la diferencia de cota, la presencia de rocas o sedimentos permeables, etc.

Para este tipo de inundaciones, se pueden identificar dos tipos principales de cauces:

1. Perennes: ríos o esteros con cuencas que abarcan grandes áreas y que tienen sus cabeceras en zonas cordilleranas. Aunque no presenten necesariamente una escorrentía superficial continua, se consideran como perennes dado que la mayoría del flujo escurre en el acuífero ubicado bajo la superficie. Estos presentan cauces de gran extensión, bien definidos, con diferentes niveles de terrazas fluviales, y fácilmente identificables a partir del análisis estereoscópico de fotos aéreas. Las terrazas más altas generalmente están ocupadas por actividades agrícolas o asentamientos humanos.
2. Intermitentes: Esteros y quebradas de escurrimiento temporal como consecuencia directa de precipitaciones intensas. En general, algunas de estas quebradas pueden presentar amenaza por fenómenos de remociones en masa del tipo flujos de detritos, existiendo una estrecha relación entre estos fenómenos e inundaciones por escorrentía torrencial de gran velocidad. Como se explicará posteriormente, los flujos de detritos, al perder su carga sólida, van transformándose paulatinamente en inundaciones torrenciales. Normalmente no existen estaciones fluviométricas en estos cauces, por lo que la estimación de caudales máximos se debe hacer con modelos matemáticos y estadísticas de precipitaciones máximas de gran intensidad.

Los efectos en la población y sus actividades estarán dados por:

1. Tiempo de aviso: En general, las inundaciones por desborde de cauce tienen un tiempo de aviso suficiente, ya que los procesos de inundación son paulatinos y permiten evacuar a la población.
2. La intensidad y velocidad con que ocurre el fenómeno
3. Densidad de población: En caso de que la población se encuentre directamente en la zona de inundación y no sea evacuada oportunamente, pueden ocurrir muertes, heridos, enfermedades, daños estructurales, etc. Si la inundación no afecta directamente a la población, puede producir cortes de camino, daños a la infraestructura sanitaria (por ejemplo, destruir captaciones de agua para el consumo humano) con un costo económico en reparaciones y medidas de mitigación.

3.2.1.2 *Inundación por Acumulación de Aguas Lluvias en Zonas Llanas, o Anegamiento*

Este tipo de inundaciones se producen en zonas deprimidas, de baja permeabilidad, con niveles freáticos someros y deficiente drenaje del terreno, frecuentemente inundadas debido a lluvias intensas y/o prolongadas. Este tipo de inundaciones se asocia a la zona de desembocadura de algunas quebradas, las que son “embalsadas” por caminos y obstrucciones antrópicas. Estas barreras no permiten que el río escurra fácilmente hacia el mar, sino solo de forma subterránea, provocando el ascenso de los niveles freáticos y la formación de zonas pantanosas y humedales. Sólo en eventos de pluviosidades extremas, el caudal transportado por las quebradas tiene la suficiente fuerza para romper esta barrera, atravesándola y provocando inundaciones por desborde de cauces.

En las zonas urbanas consolidadas, las acumulaciones de aguas lluvia ocurren especialmente en cruces viales, donde la evacuación de las aguas lluvias es insuficiente, ya sea por el colapso de los sistemas de colección, acumulación de basuras que obstruyen los desagües, la no existencia de redes de evacuación y

vialidad pavimentada, por la diferencia de nivel de las carpetas de rodado en las intersecciones de las calles existentes, o por diseñar las obras de mitigación para un período de retorno no adecuado.

El grado de daño producido por una inundación, dependerá de varios factores:

1. Tiempo de aviso: Los sistemas de emergencia y aviso a la población disminuyen considerablemente la vulnerabilidad social. Por lo demás, en general los procesos de inundación son paulatinos y permiten evacuar a la población.
2. La intensidad y velocidad con que ocurre el fenómeno
3. Densidad de población: En caso de que la población se encuentre directamente en la zona de inundación, pueden ocurrir muertes, heridos, enfermedades, daños estructurales, etc. Si la inundación no afecta directamente a la población, puede producir cortes de camino, daños a la infraestructura sanitaria (por ejemplo, destruir captaciones de agua para el consumo humano) o un costo económico en reparaciones y medidas de mitigación.

3.2.2 *Procesos de Remoción en Masa*

El término “remoción en masa” incluye una amplia variedad de procesos que generan el movimiento aguas abajo de los materiales que constituyen las laderas, incluyendo roca, suelo, relleno artificial o una combinación de las anteriores (FIGURA N° 3-9). El movimiento de estos materiales puede ser por caída, volcamiento, deslizamiento, propagación lateral o flujo (PMA-GCA, 2007).

3.2.2.1 *Desprendimientos o Caída de Rocas*

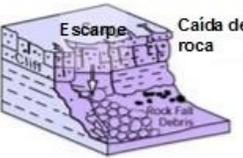
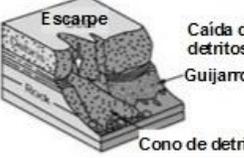
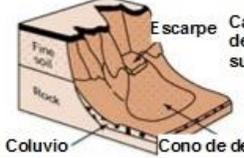
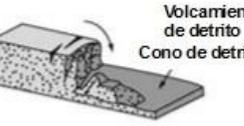
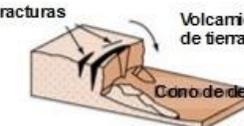
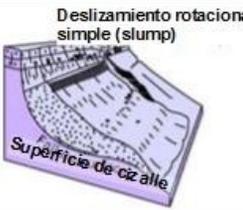
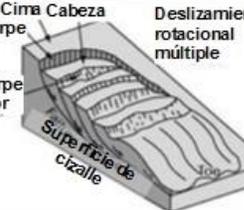
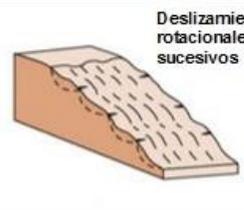
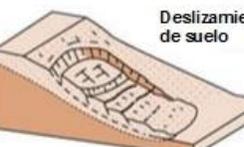
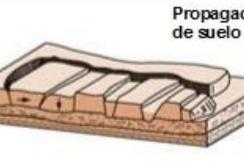
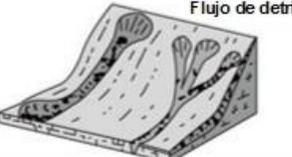
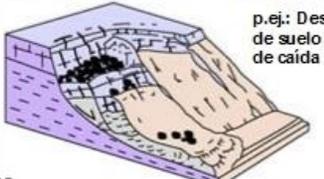
Los desprendimientos o caída de rocas son remociones en masa en las cuales bloques de rocas o suelo se desprenden a partir de laderas de altas pendientes, como cornisas o acantilados rocosos, para luego desplazarse en caída libre, al menos en parte de su trayectoria (Hauser, 2000). Normalmente, las superficies de rotura corresponden a planos de estratificación, cuya inclinación es superior a su ángulo de fricción interna, con proyección libre a la cara del talud. Entre las zonas susceptibles a sufrir desprendimientos o caídas de rocas destacan los flancos de quebradas profundas, labradas en secuencias estratificadas con niveles más duros hacia el techo, expuestas a erosión fluvial, o acantilados costeros expuestos a erosión marina.

La gravedad es el principal motor del peligro de caída de rocas. Como éste es un proceso gravitacional depende de leyes de fricción y es, por consiguiente, caótico. Dentro de los factores desencadenantes destacan los grandes sismos que pueden generar numerosos desprendimientos a partir de laderas con fuerte inclinación y con condiciones geológicas y estructurales favorables.

La caída de bloques o desprendimientos, puede producir una serie de efectos en personas, desde contusiones menores hasta la muerte, dependiendo del tamaño del bloque y la fuerza con que éste cae. En el caso de estructuras, por lo general los daños son casi nulos, pero puede producirse la rotura de vidrios o daños a muros en función del tamaño del bloque y la distancia recorrida por éste. Además, al caer un bloque en el camino puede producirse un accidente debido a maniobras de conducción para evitarlo.

En general, este peligro presenta una vulnerabilidad social, económica y estructural menor que otros peligros geológicos. Además, afecta a escala local, pero tiene una mayor incidencia debido a que su recurrencia es alta. En este peligro, el tiempo de aviso es mínimo, pero se puede mitigar indicando que la zona es susceptible a ser afectada por caída de bloques.

FIGURA N° 3-9 Clasificación de tipos de remoción en masa en relación al movimiento que lo origina y el material constituyente de la ladera

Material		ROCA	DETRITO	SUELO
Tipo de movimiento				
CAIDA		 Caída de roca Rock Fall Debris	 Caída de detritos Guijarros Cono de detrito	 Caída de suelo Coluvio Cono de detrito
	VOLCAMIENTO	 Volcamiento de roca	 Volcamiento de detrito Cono de detrito	 Fracturas Volcamiento de tierra Cono de detrito
DESPLAZAMIENTO	Rotacional	 Deslizamiento rotacional simple (slump) Superficie de cizalle	 Cima Cabeza Escarpe Escarpe menor Superficie de cizalle Deslizamiento rotacional múltiple	 Deslizamientos rotacionales sucesivos
	Traslacional (planar)	 Deslizamiento de roca	 Deslizamiento de detrito	 Deslizamiento de suelo
PROPAGACION	 <p>Estructura subhorizontal normal Quebradas Cobertura de roca Limolita arcillosa Adelgazamiento de estratos Plano de despegue Sustrato competente</p>		 Levantamiento del valle (arrasado por erosión)	 Propagación de suelo
FLUJO	 Solifluxión (Flujo de detritos periglacial)	 Flujo de detritos		 Flujo de suelo (flujo de barro)
COMPLEJO	 p.ej.: Deslizamiento de suelo con detritos de caída de rocas		 p.ej.: Deslizamiento rotacional/traslacional compuesto, gradando a flujo de suelo hacia el pie	

Fuente: Clasificación utilizada por el British Geological Service, modificada de Varnes, (1978) y Cruden & Varnes, (1996). Disponible en: http://www.bgs.ac.uk/landslides/how_does_BGS_classify_landslides.html

3.2.2.2 Deslizamientos

Los deslizamientos son remociones en masa en las cuales las masas de suelo o roca se deslizan principalmente a lo largo de superficies de ruptura, al superarse la resistencia al corte, generando el movimiento del material en su conjunto (Hauser, 2000). Los volúmenes incluidos en estas remociones varían desde algunas decenas hasta varios millones de metros cúbicos y pueden adquirir magnitud catastrófica.

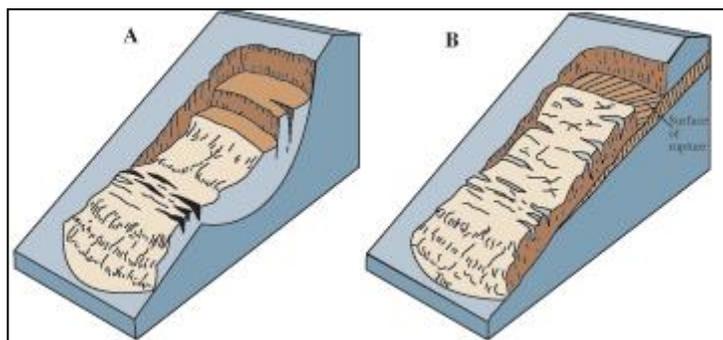
Estos fenómenos pueden ocurrir de varias formas dependiendo de las propiedades del material y las características geológicas y geomorfológicas del entorno, siendo principalmente divididos en rotacionales y traslacionales (FIGURA N° 3-10). Esto implica que las superficies de ruptura son ya sea curvas y cóncavas o a lo largo de un plano o superficie ondulada, respectivamente.

Estos fenómenos incluyen los deslizamientos que ocurren durante el retroceso de terrazas fluviales producto de la erosión fluvial o el retroceso de acantilados costeros por erosión marina basal, en especial al desarrollo de terrazas de abrasión. Este proceso es causado por la fuerza de las olas, las que cavan cavernas y desestabilizan el bloque superior, provocando que éste caiga por su propio peso (FIGURA N° 3-11). Ello produce además que el acantilado costero se encuentre en constante retroceso, lo que permite definir como zona de alta susceptibilidad todas las áreas cercanas al acantilado costero. Los mismos procesos de erosión ocurren en valles con erosión fluvial activa.

Los factores condicionantes de un deslizamiento corresponden principalmente a: los factores intrínsecos del suelo y la roca, las características geológicas (litología, estructuras, grado de alteración y meteorización, etc.), los factores geomorfológicos (pendiente, aspecto, curvatura, elevación, entre otros), la cantidad y tipo de vegetación y el grado de humedad y posición del agua subterránea.

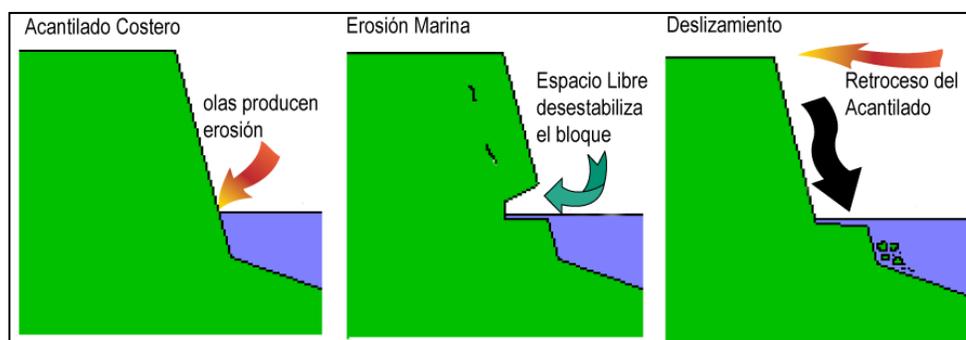
Por otro lado, estos fenómenos pueden ser generados por factores externos, denominados factores desencadenantes o gatillantes, tales como eventos hidrometeorológicos, sísmicos y actividad antrópica (excavaciones para caminos, canales, terraplenes, etc.).

FIGURA N° 3-10 Ejemplos de deslizamientos. A. Deslizamiento Rotacional, B. Deslizamiento traslacional



Fuente: Modificado de Landslide Types and Process, USGS. Fact Sheet 2004-3072. Disponible en: <http://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/images/fig3grouping-2LG.jpg>

FIGURA N° 3-11 Ejemplo de erosión por retroceso de terrazas, aplicado al desarrollo de planicies de abrasión



Fuente: Elaboración propia

Los daños en el medio antrópico producto de un deslizamiento que afecta a un área determinada, estarán dados por el volumen de material desplazado durante el proceso y la velocidad con la que se produce el deslizamiento. El grado en que un deslizamiento afecta a la población depende de:

1. Distancia al origen del fenómeno: Por lo general, los deslizamientos son procesos que afectan un área limitada (radios menores a 1 km., incluso menores a 500 m). Hay que considerar que este punto depende directamente del tamaño de volumen desplazado.
2. La intensidad y velocidad con que ocurre el fenómeno: En general, dado que estos procesos son de alta velocidad los daños potenciales son altos.
3. Densidad de población: A mayor densidad de población y área expuesta susceptible de ser afectada, mayores serán los daños esperados. Si la población se encuentra directamente en el área de alcance de un deslizamiento, la vulnerabilidad, estructural y económica es muy alta ya que la pérdida de vidas, viviendas y productividad son efectos típicos de este peligro geológico. Por otro lado, si un deslizamiento afecta a caminos, acueductos o líneas eléctricas puede producir aislamiento, enfermedades gastrointestinales y pérdidas económicas en general para la población.
4. Tiempo de aviso: Sin estudios de detalle no hay forma de predecir este tipo de procesos. Si se realizan estudios específicos, es posible conocer el o los factores gatillantes de las remociones en masa en un área determinada. Si estos factores gatillantes pueden ser monitoreados, es posible generar sistemas de alerta. Por ejemplo, si el factor gatillante son las precipitaciones sobre un cierto nivel umbral de intensidad, es posible generar sistemas de alerta que se activen cuando se sobrepasa dicho umbral.

3.2.2.3 Flujos de Detritos y Barro

Los flujos de detritos, referidos comúnmente como 'aluviones', son remociones en masa que ocurren cuando una masa de sedimentos con mala clasificación, agitados y saturados con agua, se movilizan pendiente abajo como flujos viscosos de sedimentos concentrados (Antinao, et al., 2002). Los flujos de detritos usualmente son descritos como fluidos no-newtonianos o plásticos de Bingham, donde la fracción sólida varía generalmente entre 50 a 90% en volumen (Costa, 1984). En los casos en que la granulometría del material transportado sea predominantemente fina estos flujos se conocen como flujos de barro.

Las partículas sueltas que cubren pendientes desnudas y otros depósitos detríticos no consolidados, disponibles dentro de la cuenca de recepción, son transportadas hacia el cauce principal donde continúa su movimiento. Se remueven así depósitos de gravas y arenas sueltas del lecho, hasta alcanzar el área de depositación, que corresponde al sitio de salida de dichas quebradas a zonas más llanas donde se forman abanicos aluviales. Con la disminución de la pendiente, a medida que aumenta la distancia desde su fuente, los flujos van perdiendo su carga sólida de mayor granulometría, por lo que van pasando paulatinamente a flujos de barro y finalmente a inundaciones o flujos hiperconcentrados donde la fracción sólida varía generalmente entre 1 a 25% en volumen (Pierson & Scott, 1985).

Para la ocurrencia de flujos de detritos es necesario que exista una cuenca donde se colecten los aportes de lluvia y una zona de acumulación de material donde los detritos se acopien para ser posteriormente transportados en el caso de que se cumpla alguna condición desencadenante.

En Chile, el factor desencadenante más común de flujos de detritos son las lluvias esporádicas, de corta duración y de intensidad excepcional. Por otro lado, en nuestro país existen muy pocos estudios que relacionen las intensidades de precipitaciones y este tipo de fenómenos, debido, principalmente, a los escasos registros de intensidad de precipitaciones y de flujos de detritos históricos. Sólo durante las últimas décadas se han instalados pluviógrafos que miden la intensidad instantánea u horaria de precipitaciones (mm por hora). Sólo se disponen de registros más sostenidos en el tiempo de precipitaciones diarias (mm en 24 horas). Esto dificulta los análisis de relación a estas variables ya que a veces basta una lluvia "corta" pero extremadamente intensa para generar un flujo de detritos.

Los flujos o "aluviones" del 18 de Junio de 1991 en Antofagasta y del 3 de Mayo de 1993 en la Quebrada de Macul en Santiago Oriente son ejemplos de eventos que han suscitado el interés nacional tanto por el alto grado de daños materiales como el costo de vidas humanas. Estos eventos han sido, por otra parte, un aporte para el conocimiento de los umbrales de intensidad de precipitaciones mínimas para la generación de flujos de detritos en Chile. En el caso de Antofagasta, en una de las zonas más secas del país, se estimaron precipitaciones mínimas de 30 mm en 24 horas para la generación de flujos de detritos (Hauser, 1997). En el caso de Santiago Oriente, se contó con datos pluviográficos más precisos, donde se registraron casi 10 mm en una sola hora (Naranjo & Varela, 1996). Anteriormente, para la Región Metropolitana se estimó un mínimo de 60 mm en 24 horas para la generación de flujos de detritos (Hauser, 1985). Si bien los casos anteriores se encuentran fuera del área de estudio, cabe destacar que corresponden a los pocos eventos donde se ha relacionado cuantitativamente la ocurrencia de estos fenómenos y la intensidad de precipitaciones. Sin embargo, estos constituyen datos valiosos en cuanto a los umbrales de intensidad de precipitaciones en las que se podrían generar flujos de características catastróficas.

El grado de daño producido por un flujo dependerá de varios factores:

1. Tiempo de aviso: Los sistemas de emergencia y alerta a la población disminuyen considerablemente la vulnerabilidad social. Si se tienen mediciones continuas de la intensidad de precipitación, será posible alertar a la población de que existe la posibilidad de que se genere un flujo, entregando quizás minutos valiosos que podrían salvar vidas.
2. Distancia al origen del fenómeno: Mientras más alejado sea el origen, y si se cuenta con sistemas de emergencia y alerta a la población, se puede disminuir la vulnerabilidad social.
3. La intensidad y velocidad con que ocurre el fenómeno (tamaño del flujo): Un flujo de mayor tamaño y rápido tiene mayor capacidad de afectar a una población que uno más pequeño y lento.
4. Densidad de población en la zona susceptible a ser afectada: En caso de que la población se encuentre directamente en el cauce del flujo, los daños pueden ser catastróficos, ya que pueden

producirse muertes, heridos, enfermedades, daños estructurales mayores, etc., tal como ocurrió en los casos de Antofagasta (1991) y Quebrada de Macul (1993). Si el cauce no afecta directamente a la población, pueden producirse cortes de caminos y daños a la infraestructura sanitaria (por ejemplo, destrucción de captaciones de agua para el consumo humano), lo que se traduce en un costo económico en reparaciones y medidas de mitigación.

Este peligro geológico será tratado en conjunto con el peligro de inundación por desborde de cauce, ya que estos dos fenómenos comparten una serie de características comunes que permiten estudiarlos como un mismo proceso.

3.3 Resumen de Peligros Geológicos

En el CUADRO N° 3-2 se incluyen los principales peligros geológicos y la escala de las distintas fuentes de información asociadas a cada uno.

CUADRO N° 3-2 Resumen Peligros Geológicos a ser estudiados y su escala de trabajo

PELIGRO	DESCRIPCIÓN	PELIGROS ASOCIADOS	ESCALA	ZONIFICACIÓN A PARTIR DE:
Volcánico	El peligro volcánico, se asocia a los procesos asociados a la erupción de un volcán. La zona ubicada entre las latitudes 33° a 46° S, presenta el índice de actividad volcánica más alto del país, con un promedio de una erupción cada 0,7 años entre los años 1.800 y 1.990 (Moreno, 1993). Aunque en general, los centros volcánicos se encuentran emplazados donde la densidad demográfica es baja, los productos asociados a una erupción volcánica pueden tener alcances de centenares de kilómetros. Se analizarán los centros volcánicos próximos al área de estudio, esto es, aquellos ubicados entre los 41.5° y 43.5° S. Estos corresponden a los volcanes Yate, Hornopirén, Hualaihué o Apagado, Huequi, Barranco Colorado, Porcelana, Michinmahuida, Chaitén, Corcovado, Avalancha, Yelcho y Yanteles-Nevado.	Lluvia de Tefra y Proyectiles Balísticos	>1:100.000	Antecedentes Históricos y Comparación con Otras zonas
		Flujos Piroclásticos	1:50.000	Antecedentes Históricos, Mapas de Acumulación, Mapas Geológicos
		Escurrimiento de Lavas	1:50.000	Antecedentes Históricos, Mapas de Acumulación, Mapas Geológicos
		Remociones en masa y lahares	1:50.000	Antecedentes Históricos, Mapas de Acumulación, Mapas Geológicos
		Sismicidad	>1:100.000	Antecedentes históricos
Remociones en Masa	Procesos en las que un volumen de roca o suelo es transportado por procesos gravitacionales. Se reconocen 2 tipos principales, los deslizamientos y las Caídas de Rocas. Su alcance es en general limitado, y debe ser tratado como un peligro geológico local (escala <1:10.000). El estudio a detalle se realizará dentro de las zonas urbanas o con características urbanas de las ocho localidades estudiadas	Deslizamientos	1:20.000	Interpretación de Fotografías aéreas, Mapa Geológico, Mapa Geomorfológico, Métodos Bayesianos.
		Desprendimiento o Caída de Rocas	1:20.000	Interpretación de Fotografías aéreas, Mapa Geológico, Mapa Geomorfológico, Métodos Bayesianos.
Flujos e Inundaciones	Análisis de los principales peligros asociados a eventos pluviométricos extremos, los flujos de detritos, referidos comúnmente como 'aluviones', e inundaciones. Aguas arriba se tratarán a una escala 1:50.000 o 1:25.000, dependiendo de los datos disponibles y en las zonas urbanas o con características urbanas de las ocho localidades estudiadas se tratarán a una escala 1:5.000	Flujos de Detritos	1:20.000	Interpretación de Fotografías aéreas, Mapa Geomorfológico y Mapa Geológico.
		Inundaciones por desborde	1:20.000	Antecedentes Históricos, Interpretación de Fotografías aéreas, Mapa Geomorfológico y Mapa Geológico.
		Inundaciones por anegamiento	1:20.000	Antecedentes Históricos, Interpretación de Fotografías aéreas, Mapa Geomorfológico y Mapa Geológico.
Sismicidad	Se analizarán los principales eventos sísmicos y los peligros asociados a ellos. Se zonificarán, además, los sectores que pueden presentar una mala respuesta de sitio ante eventos sísmicos.	Movimientos de Terreno	>1:100.000	Antecedentes Históricos y Comparación con Otras zonas
Maremotos	Se analizarán los registros históricos de maremotos que hayan afectado al área de estudio, su fuente de origen (sismos mayores, remociones en masa, volcanismo) y los peligros asociados a ellos.	Inundaciones Costeras	1:20.000	Antecedentes Históricos, Interpretación de Fotografías aéreas, Mapa Geomorfológico.

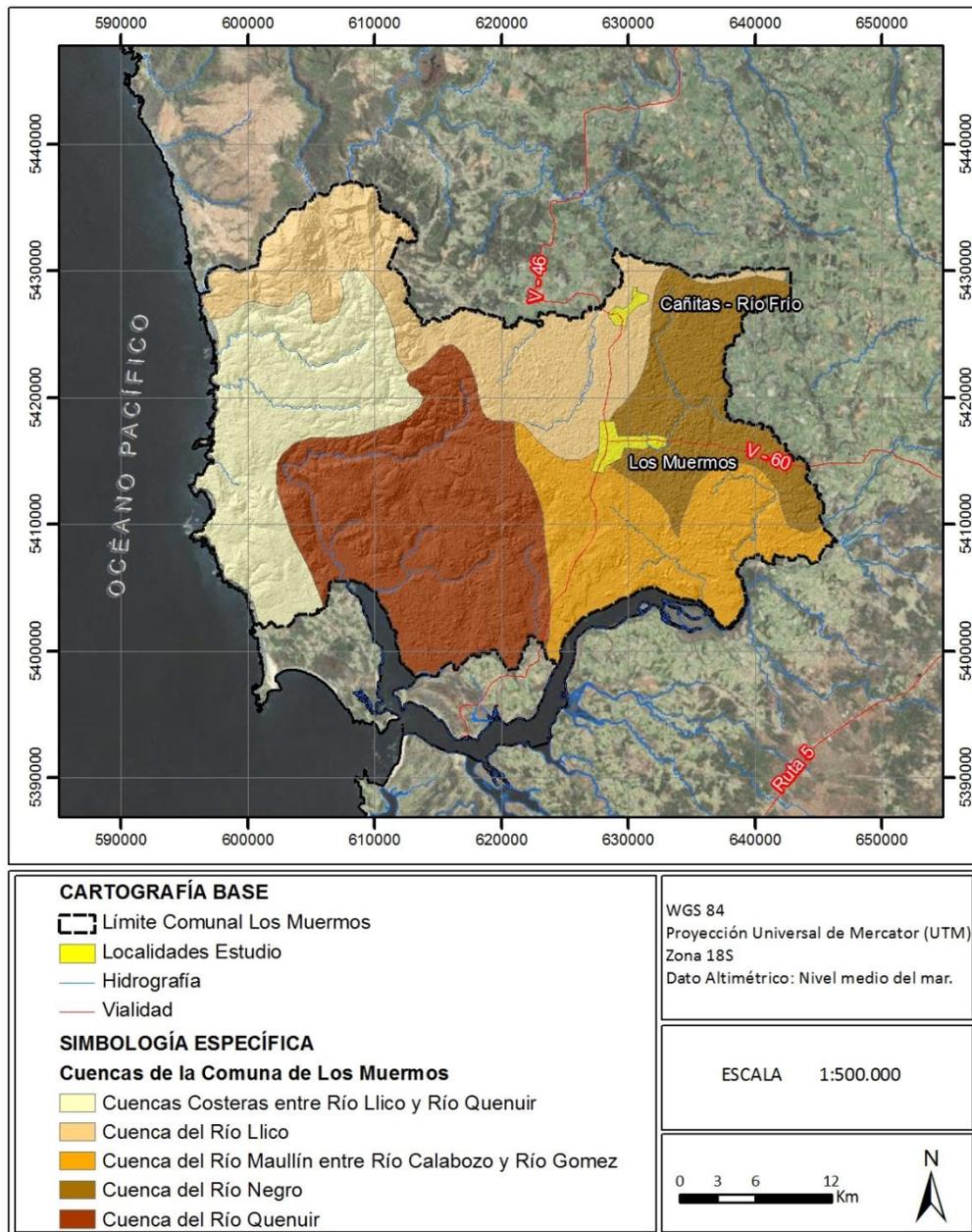
Fuente: Elaboración Propia.

4. LÍNEA DE BASE

4.1 Marco Hidrológico

La comuna de Los Muermos se ubica dentro de la cuenca hidrográfica del Río Maullín (FIGURA N° 4-1). El río Maullín es preandino y se origina en el lado occidental del Lago Llanquihue. Recorre una distancia de 85 km, originando una cuenca que cubre 4298 km² y con un caudal promedio de 72 m³/s (Niemeyer & Cereceda, 1984), registrando escorrentía permanente.

FIGURA N° 4-1: Principales cuencas del área de estudio



Fuente: Elaboración propia a partir de Cuencas DGA

4.2 Marco Geodinámico

Chile se ubica en un margen convergente de placas tipo océano-continente (FIGURA N° 4-2), donde la Placa Oceánica de Nazca subducta a la Placa Continental Sudamericana bajo su margen occidental, con una tasa actual de convergencia se estima en 8 cm/año (DeMets, et al., 1994), activa al menos desde, el Jurásico (Ramos, et al. (1986), Mpodozis y Ramos (1989) y ha tenido variaciones en la tasa de convergencia durante el Eoceno – Mioceno que van desde 5 a 15 cm/año (Somoza, 1998).

El área de estudio se encuentra alrededor de los 41,30°S, zona que se ubica dentro del esquema de segmentación andina de Mpodozis y Ramos (1989), entre los 33° y los 46°S, que corresponde a una zona de subducción tipo chilena que se caracteriza por un ángulo de subducción entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana de aproximadamente 30°. Este segmento se encuentra al sur del segmento ubicado entre los 27° S y los 33°, que se caracteriza por una subducción plana (~10°) y se encuentra aparentemente controlado por la subducción de la dorsal asísmica de Juan Fernández. Si se comparan ambos segmentos, se destacan las siguientes características:

1. La costa Oeste de la placa Sudamericana tiene un rumbo aproximado NS en el tramo de subducción plana, mientras que al sur de los 33° la costa posee un rumbo aproximado N20°E.
2. En el tramo norte, no se aprecia el desarrollo de una depresión central, en cambio se presentan valles transversales en el antearco. En cambio, en el segmento sur, en el cual se ubica la zona de estudio, se desarrolla claramente la Depresión Central, con una Cordillera de la Costa y Cordillera Principal bien definidas.
3. En el sector de subducción plana no hay registro de volcanismo Holoceno en la Cordillera Principal, mientras que en el área de estudio, el arco volcánico Holoceno se encuentra plenamente desarrollado.

FIGURA N° 4-2 Vista en 3D donde se representa el marco geodinámico, se aprecia la Dorsal de Juan Fernández y el lugar donde es subductada frente a los 33° S. La línea verde señala la fosa, lugar donde subducta la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, las flechas muestran las direcciones y velocidades de convergencia entre ambas placas



FUENTE: Elaboración propia.

La acumulación y posterior relajación de los esfuerzos producto del régimen de subducción es la causa de que todo Chile hasta la península de Taitao, sea afectado frecuentemente por terremotos. La gran mayoría de estos sismos y los eventos de magnitud, se originan en la zona del contacto entre placas y corresponden a la liberación súbita de la mayor parte de la energía acumulada durante el proceso de subducción (Ej. Sismos del 6 de abril de 1943 que afectó a la IV Región, 3 de Marzo de 1985 de la V región, sismos de Mayo de 1960 en

Valdivia). Los esfuerzos causados por la subducción también se propagan hacia el interior de la placa continental, y se liberan mediante sismos superficiales, normalmente de menor magnitud pero más destructivos localmente. (Ej. Sismo de Las Melosas de 1958, Sismo de Chuzmisa de 2001). Otros sismos son provocados por la relajación de esfuerzos en la placa de Nazca una vez subductada, estos sismos pueden ser muy destructivos a pesar de no tener las mayores magnitudes (Ej. Sismo de Chillán de 1939, sismo de Punitaqui de 1997 y sismo de Tarapacá 2005).

4.3 Marco Geomorfológico

El segmento andino chileno al sur de los 33° S, muestra 4 unidades morfoestructurales principales (FIGURA N° 4-3), dispuestas en franjas orientadas norte – sur. De oeste a este estas son: Planicies Litorales, Cordillera de la Costa (CC), Depresión Central (DC) y Cordillera Principal (CPr), que comparten Chile y Argentina.

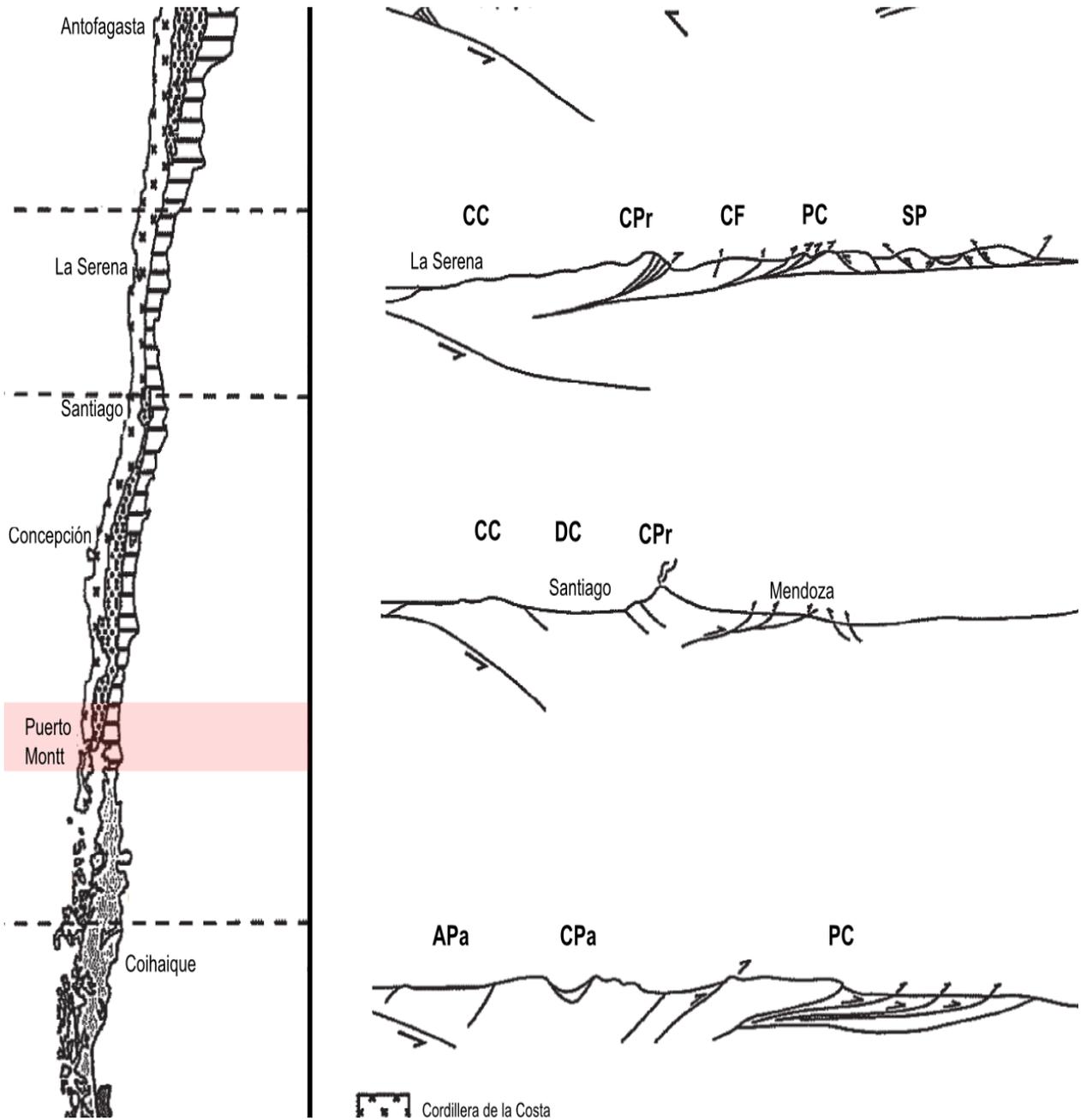
La Depresión Central se ubica inmediatamente al oeste de la Cordillera de la Costa, denominada en el sector como Cordillera de Zarao. En esta faja adquiere un amplio desarrollo con una microtopografía ondulada de sedimentación glacio-fluvio-volcánica. Hacia el sector precordillerano se encuentra ocupada en su mayor parte por sistemas lacustres de importancia: Los lagos Ranco, Puyehue, Rupanco y Llanquihue corresponden a lagos del Llano Central.

El volcanismo activo, la erosión glacial, las depresiones lacustres, un llano central ondulado, una Cordillera de la Costa baja y fragmentada, son los rasgos geomorfológicos característicos de la región, que le han dado su particular personalidad (Börgel, 1983).

Desde los Muermos hasta Puerto Montt se genera un solo complejo sedimentario que corresponde a la planicie de Maullín.

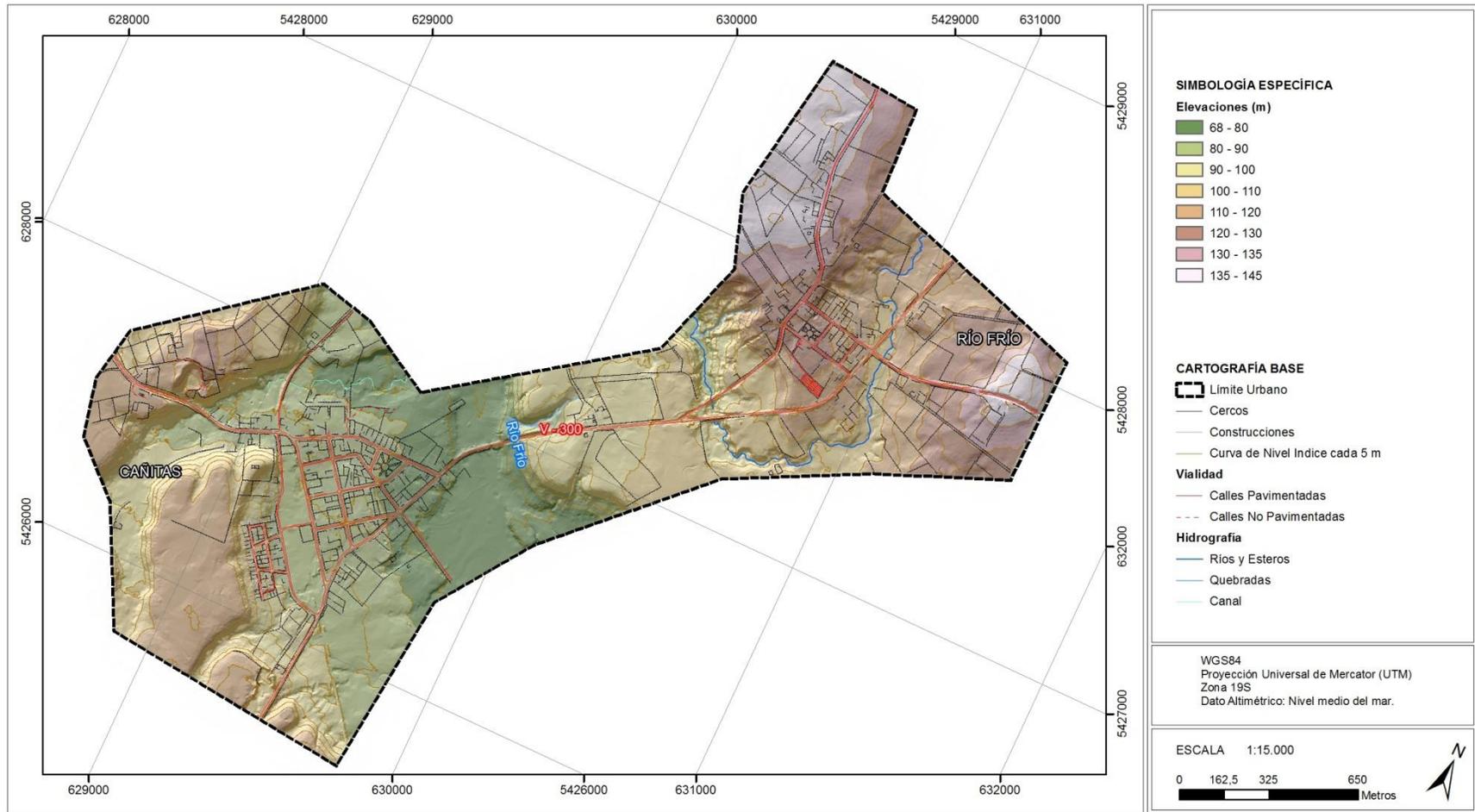
La comuna de Los Muermos se emplaza en la Depresión Central, la que presenta alturas no superiores a los 350 msnm, con superficies planas, de pendientes suaves a muy suaves, variables entre 0% y 15% y con el desarrollo de una microtopografía ondulada – característica de la sedimentación glacio fluvial. En general las localidades presentan elevaciones que varían entre los 50 y 150 m s.n.m. (FIGURA N° 4-4 y FIGURA N° 4-5), con susaves lomajes (FIGURA N° 4-6 y FIGURA N° 4-7) y una morfología claramente asociada a la acción glacial durante el Pleistoceno (FIGURA N° 4-8 y FIGURA N°4-9).

FIGURA N° 4-3: Segmentación Andina



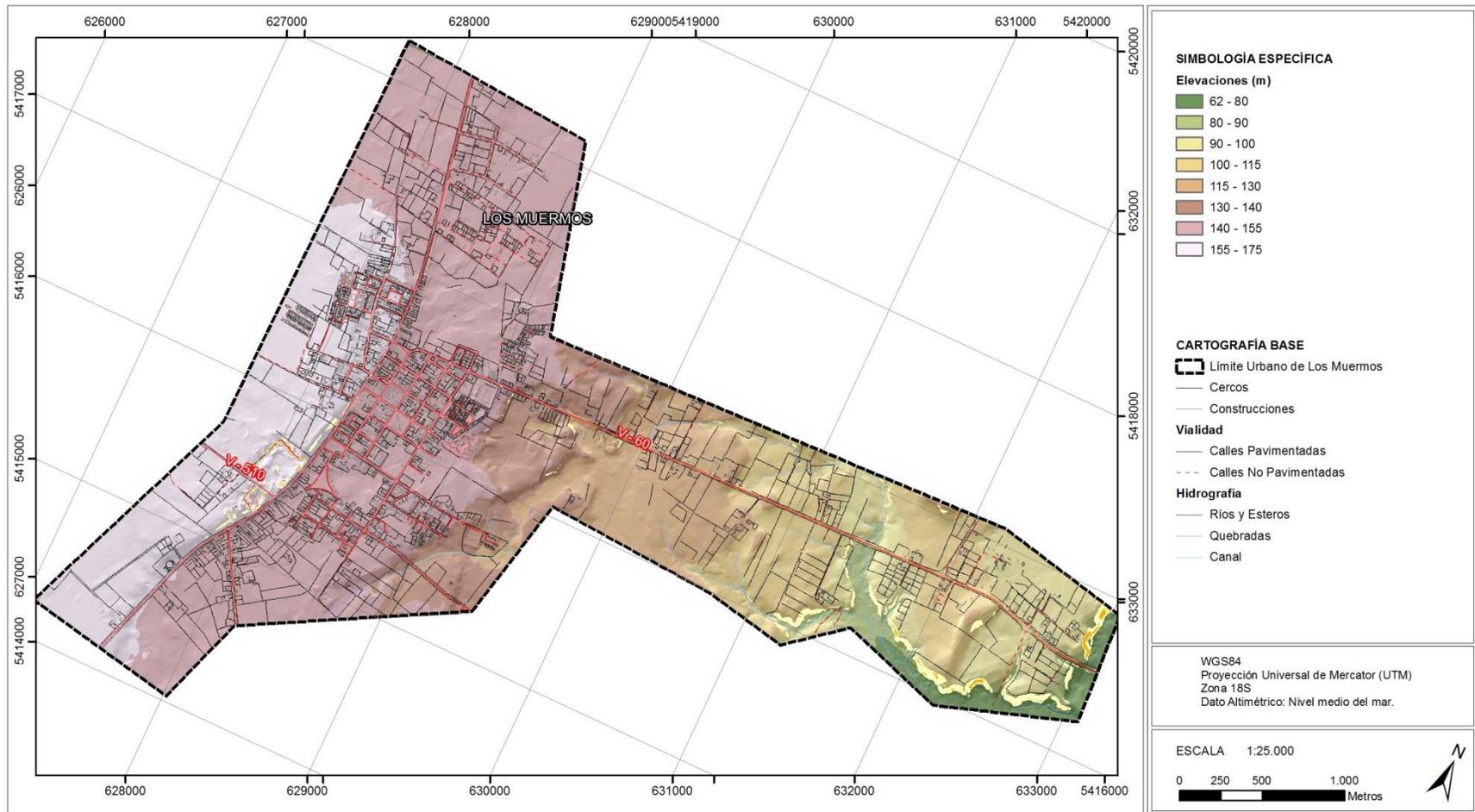
Fuente: Charrier, Pinto, & Rodríguez, (2007)

FIGURA N° 4-4 Carta de Elevación Cañitas-Río Frío



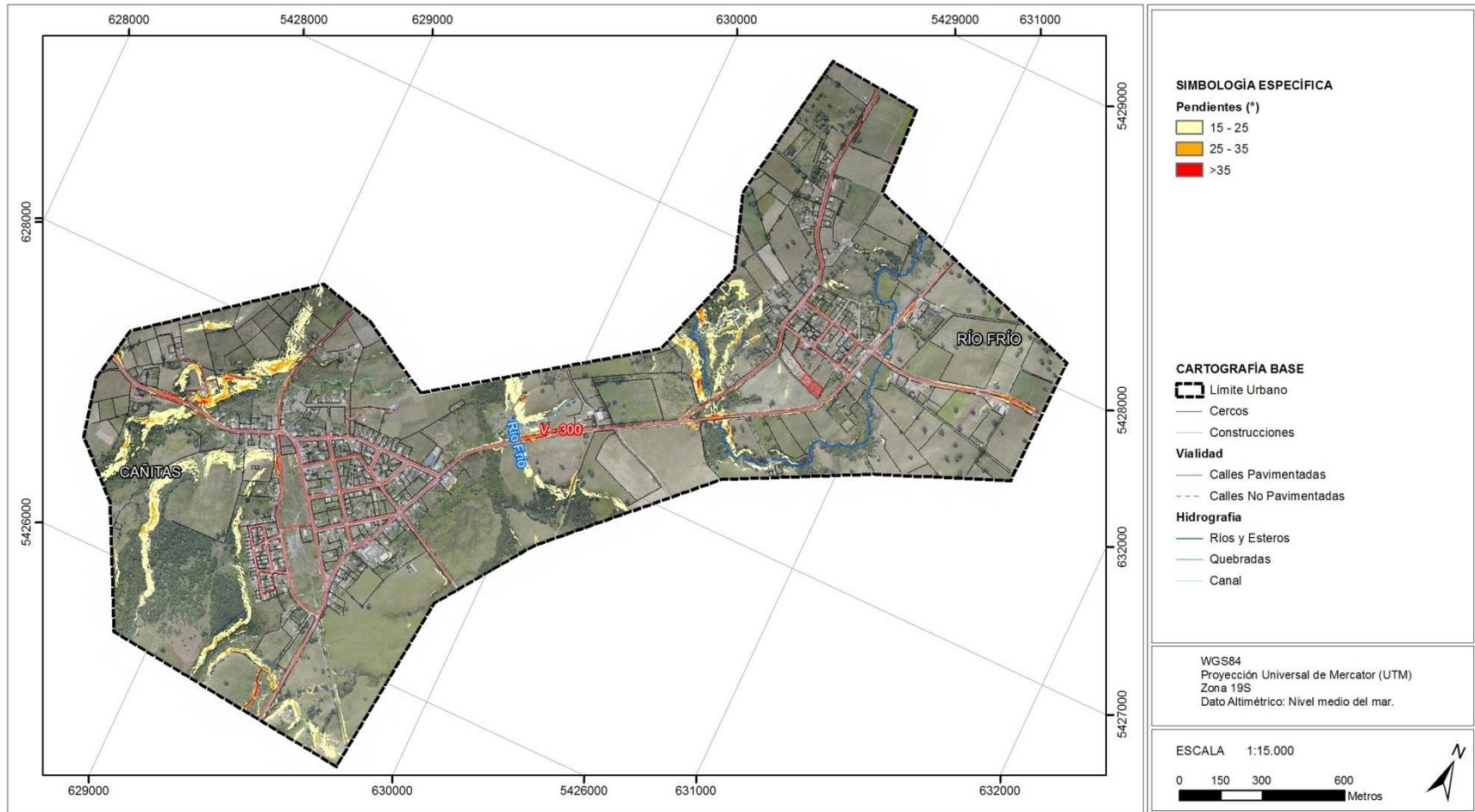
Fuente: Elaboración propia a partir de ASTER GDEM

FIGURA N° 4-5 Carta de Elevación Los Muermos



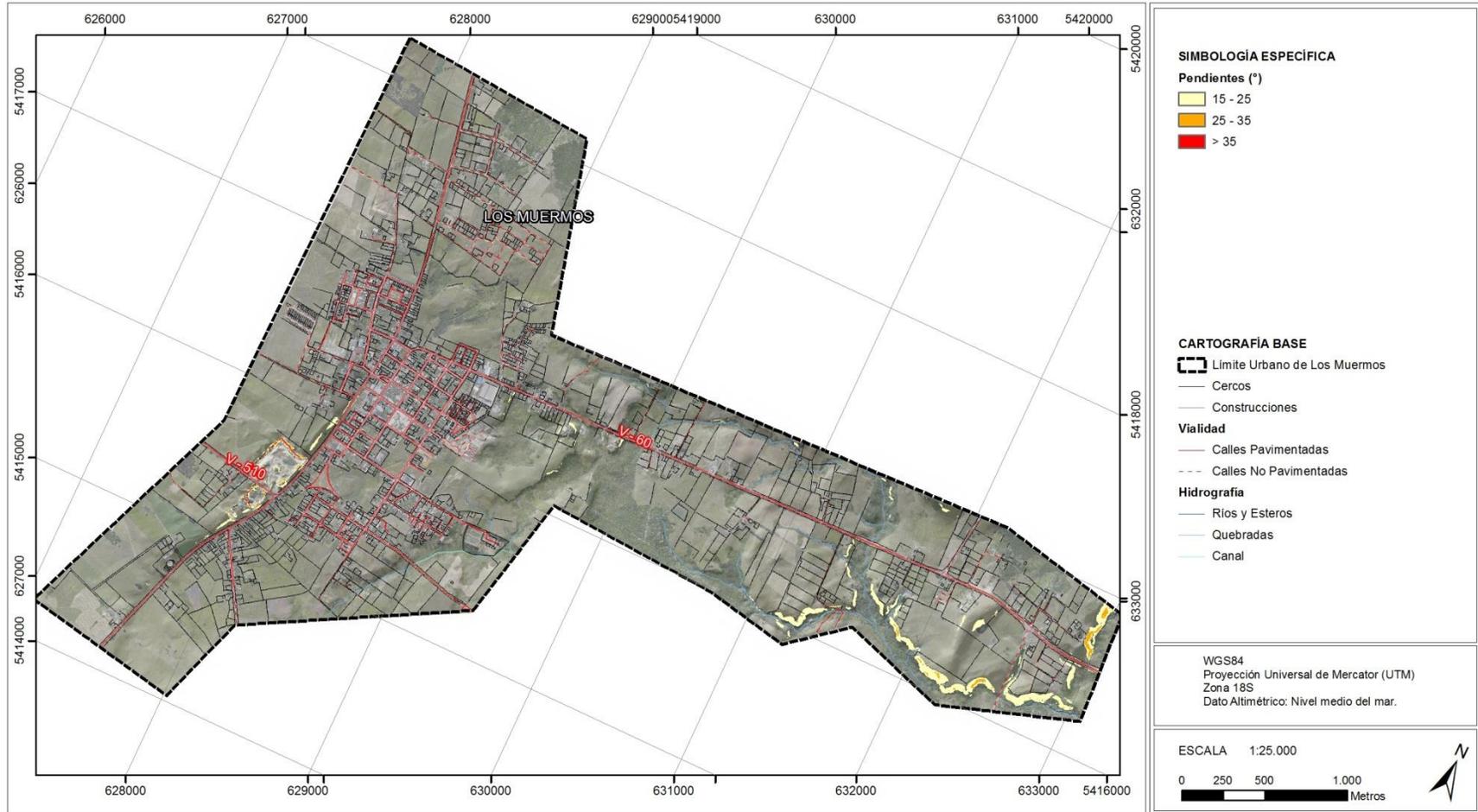
Fuente: Elaboración propia a partir de ASTER GDEM

FIGURA N° 4-6 Carta de Pendientes Cañitas-Río Frío



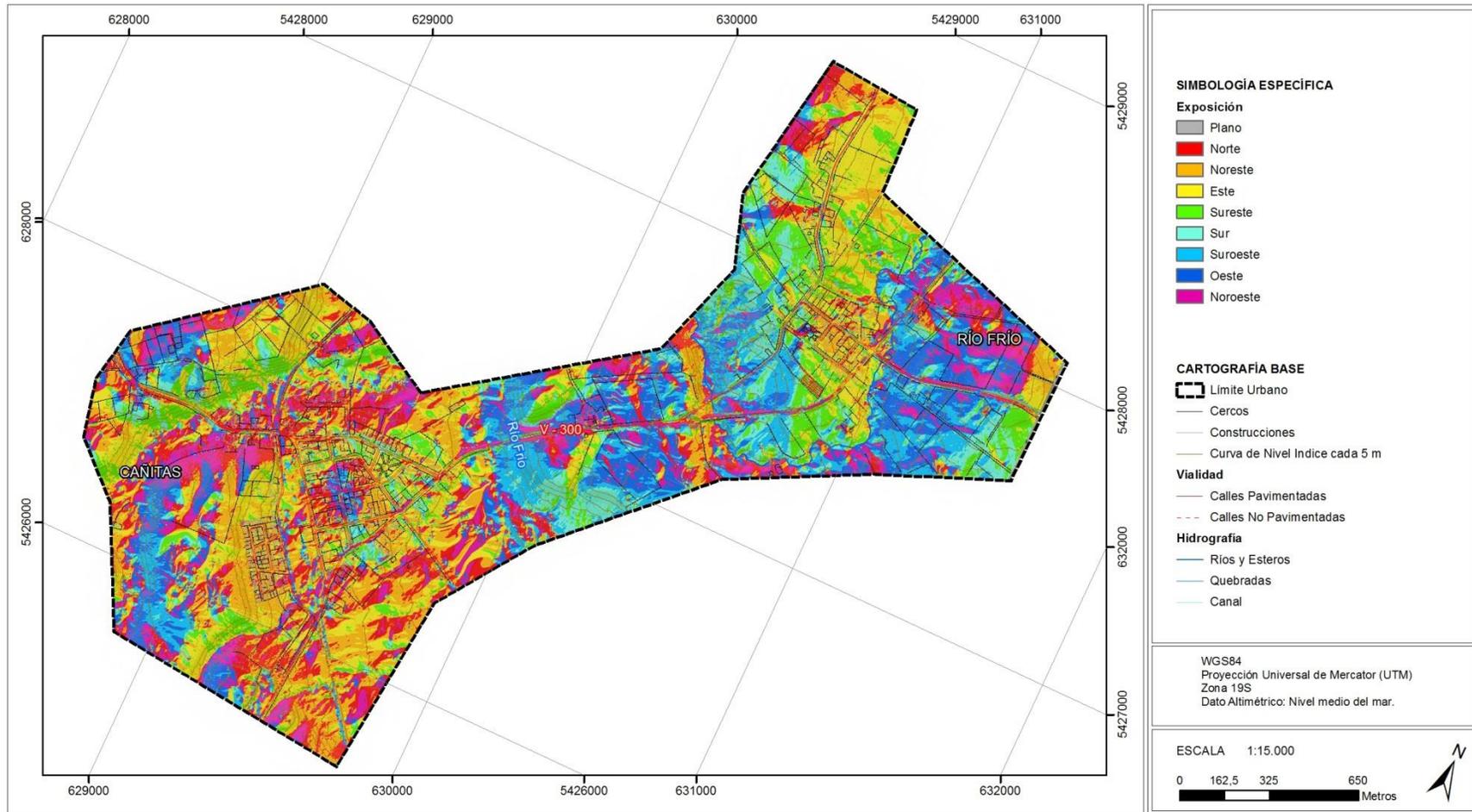
Fuente: Elaboración propia a partir de ASTER GDEM

FIGURA N° 4-7 Carta de Pendientes Los Muermos



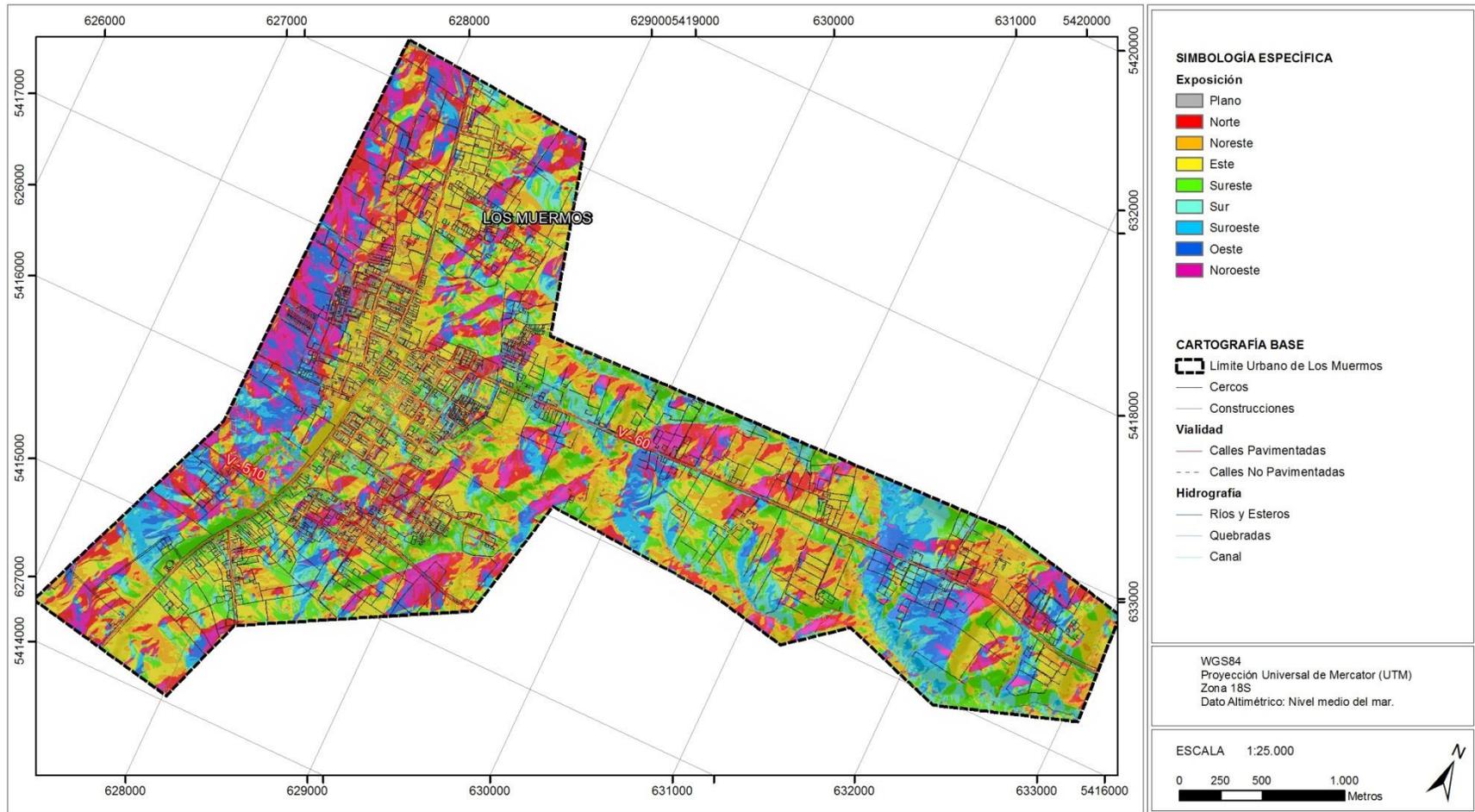
Fuente: Elaboración propia a partir de ASTER GDEM

FIGURA N° 4-8 Carta de Exposición Cañitas-Río Frío



Fuente: Elaboración propia a partir de ASTER GDEM

FIGURA N° 4-9 Carta de Exposición Los Muermos



Fuente: Elaboración propia a partir de ASTER GDEM

4.4 Marco Geológico Comunal

La geología del área de estudio de la comuna de Los Muermos, en particular las zonas de Los Muermos, Río Frío y Cañitas está constituida principalmente por depósitos del Pleistoceno-Holoceno, los cuales son producto de procesos de remociones en masa tales como aluviones, coluvios, así como también glaciares, fluvio-glaciares y glacialacustres (SERNAGEOMIN, 2003).

La FIGURA N° 4-10 muestra la geología de un área más amplia a la de estudio, abarcando toda la comuna de Los Muermos, incluyendo la zona costera. Esta se puede describir de manera general al oeste de la zona de estudio, por secuencias de rocas sedimentarias marinas del Mioceno que afloran en la unidad geomorfológica de la Cordillera de la Costa. En el área costera afloran rocas metamórficas, cuyas edades de metamorfismo, van desde el Pérmico al Triásico.

4.4.1 *Unidades de Roca*

4.4.1.1 *Unidades estratificadas*

Complejo Metamórfico Bahía Mansa, CMBM (Paleozoico-Triásico).

Entre los 39°30'S y los 42° S, las rocas metamórficas se extienden a través de toda la Cordillera de la Costa, y es la localidad de Bahía Mansa que las asociaciones litológicas que las componen.

El CMBM corresponde a un conjunto heterogéneo de rocas metamórficas, que incluye a esquistos pelíticos a semipelíticos y menor proporción de metareniscas, esquistos máficos, rocas máficas y ultramáficas y, escasamente metacherts y rocas miloníticas a ultramiloníticas (Duhart, et al., 2001). También, muy localmente, han sido descritas rocas cuyo protolito se interpretó como metaignimbritas intercaladas en esquistos pelíticos (Söllner, et al., 2000) y diques félsicos e intrusivos traquíticos (Duhart, 1999).

Complejo Volcánico Pargua, (Oligoceno - Mioceno).

Corresponde a secuencias y centros volcánicos básicos y antiguos, compuestos por lavas, brechas y rocas piroclásticas. Aflora en la costa de la comuna.

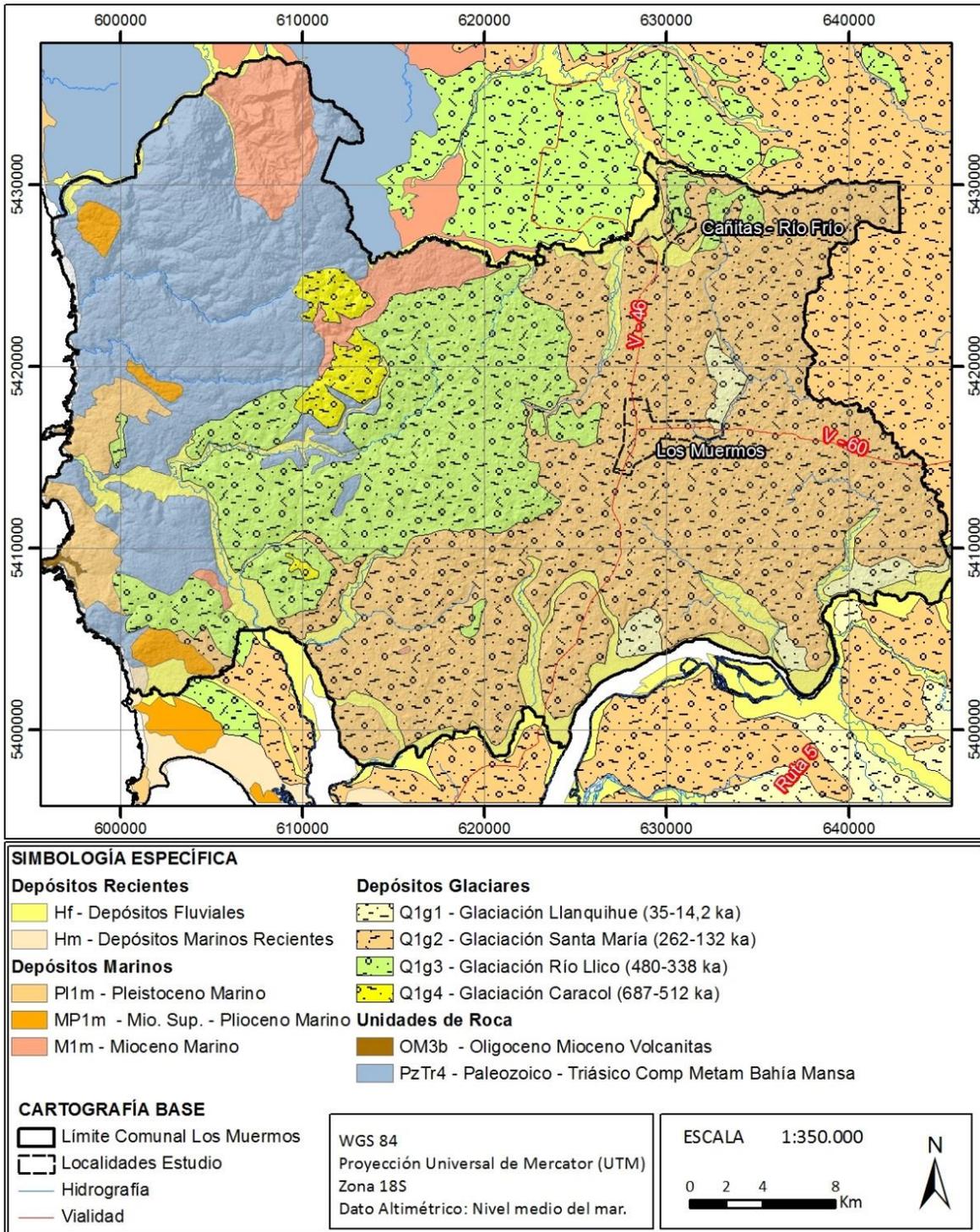
Depósitos Marinos Consolidados del Neógeno Superior (Mioceno – Holoceno)

Dentro de estos depósitos se reconocen principalmente areniscas finas, arcillolitas, lutitas y limolitas, donde se reconocen 3 formaciones principales: La Formación Huilma, Tubul y Estratos de Niebla. Algunos horizontes presentan concreciones calcáreas, impresiones de microfósiles y frecuente microfauna (García, 1968) lo que permite asignarles una edad que varía entre el Mioceno Superior y el Holoceno. Por el carácter micáceo de los sedimentos que componen las rocas de la formación se cree que provienen de la erosión del Complejo Metamórfico Bahía Mansa.

4.4.1.2 *Depósitos No Consolidados Fluviales, Aluviales y Coluviales (Pleistoceno-Holoceno)*

Corresponde a gravas, arenas y limos, asociados a los cauces actuales de los ríos.

FIGURA Nº 4-10: Mapa Geológico del área de estudio



Fuente: Elaboración propia a partir de SERNAGEOMIN (2003)

4.4.1.3 *Depósitos No Consolidados Glaciares (Pleistoceno-Holoceno)*

Corresponde a depósitos morrénicos, fluvioglaciares y glacialacustres, compuestos por diamictos de bloques y matriz de limo/arcilla, gravas, arenas y limos. En el área de estudio corresponde a lobulos morrénicos en el frente de lagos proglaciales, abanicos fluvioglaciales frontales o varves en la ribera de lagos o cursos fluviales, asociados a las principales glaciaciones del Pleistoceno. De acuerdo a SERNAGEOMIN (2003) se le asignan a las glaciaciones Llanquihue (32-12,2 ka), Santa María (262-132 ka), Río Llico (480-338 ka) o Caracol (687-512 ka)

4.5 Marco Geológico Local

A continuación se detalla la geología local de las localidades de Los Muermos, Cañitas y Río Frio, a partir de la interpretación de imágenes satelitales, fotografías aéreas y la visita a terreno realizada en Enero de 2012. En general, en ambas localidades se reconocen principalmente depósitos glaciares y fluvioglaciares, los que actualmente son disectados por los cauces actuales de ríos y quebradas. Las principales unidades reconocidas se presentan en la FIGURA N° 4-11 y FIGURA N° 4-12, y se describen a continuación:

4.5.1 *Depósitos Fluviales Activos*

Corresponden a depósitos de facies fluviales, reconocidos en las planicies fluviales cercanas a los cauces activos de los ríos Paloma, Frío y Nadi, además de las quebradas menores reconocidas en el área de estudio. Están compuestas por bolones y gravas no consolidadas, redondeados a bien redondeados, clastosoportados y baja esfericidad. De manera ocasional se encuentra imbricados y son polimícticos, y asociados a lentes de arenas no consolidadas o limos finamente laminados. Se les asigna una edad Holocena, ya que disectan a los depósitos fluvioglaciares antiguos y a los Depósitos Glaciares 1 y 2.

4.5.2 *Depósitos Fluvioglaciares Antiguos*

Corresponden a depósitos de facies fluviales-glaciares, reconocidos en las llanuras de inundación de Río Frio. Se asocian a las principales glaciaciones del Pleistoceno donde son indiferenciados o relativos a las glaciaciones Llanquihue (depósitos glaciares 1), Santa María (depósitos glaciares 2) y Río Llico (depósitos glaciares 3).

Están compuestas por bloques, bolones y gravas no consolidadas, subangulosos a subredondeados, matriz soportados y baja esfericidad. Corresponden a la actual llanura de inundación. Se les asigna una edad Pleistoceno Superior – Holoceno, ya que disectan a los Depósitos Glaciares 1, 2 y 3.

4.5.2.1 *Depósitos Glaciares 1*

Corresponde a depósitos morrénicos, fluvio-glaciares y glacialacustres, compuestos por diamictos de bloques y matriz de limo/arcilla, gravas, arenas y limos. Se les asigna una edad Pleistoceno, posteriores a los Depósitos Glaciares 2 ya que sobreyacen en discordancia de erosión a esta unidad y son disectados por los Depósitos Fluvio-glaciares Antiguos.

4.5.2.2 *Depósitos Glaciares 2*

Corresponde a depósitos morrénicos, fluvio-glaciares y glacialacustres, compuestos por diamictos de bloques y matriz de limo/arcilla, gravas, arenas y limos. Se les asigna una edad Pleistoceno, previos a los Depósitos Glaciares 2 ya que son disectados por esta unidad.

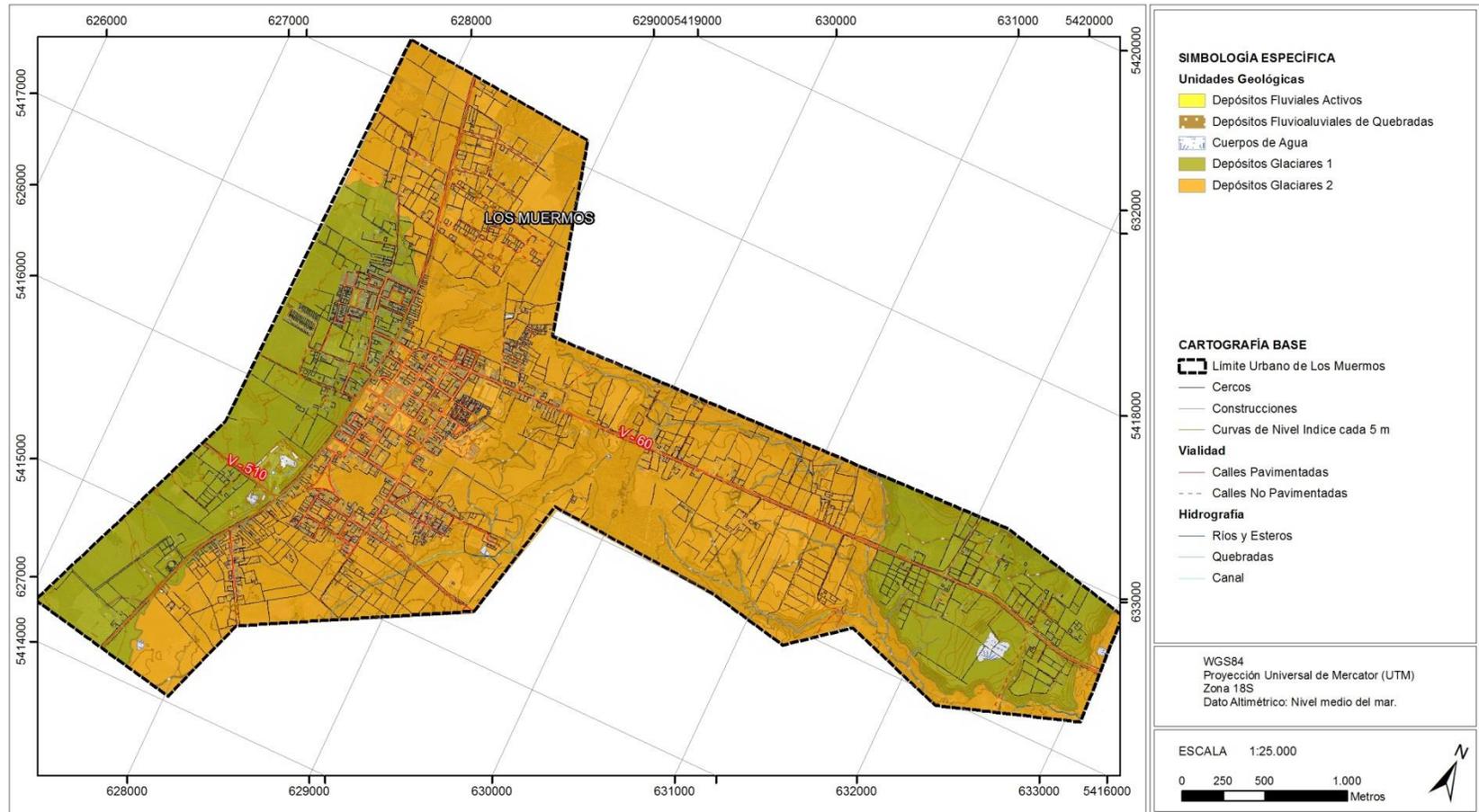
4.5.2.3 *Depósitos Glaciares 3*

Corresponde a depósitos morrénicos, fluvio-glaciares y glacialacustres, compuestos por gravas mal seleccionadas sin estratificación en matriz de arcilla, limo y arenas finas con abundante presencia de óxidos de Mn y Fe que otorga color pardo rojizo anaranjado oscuro a esta unidad. Clastos meteorizados y deleznales.

4.6 Marco Hidrogeológico

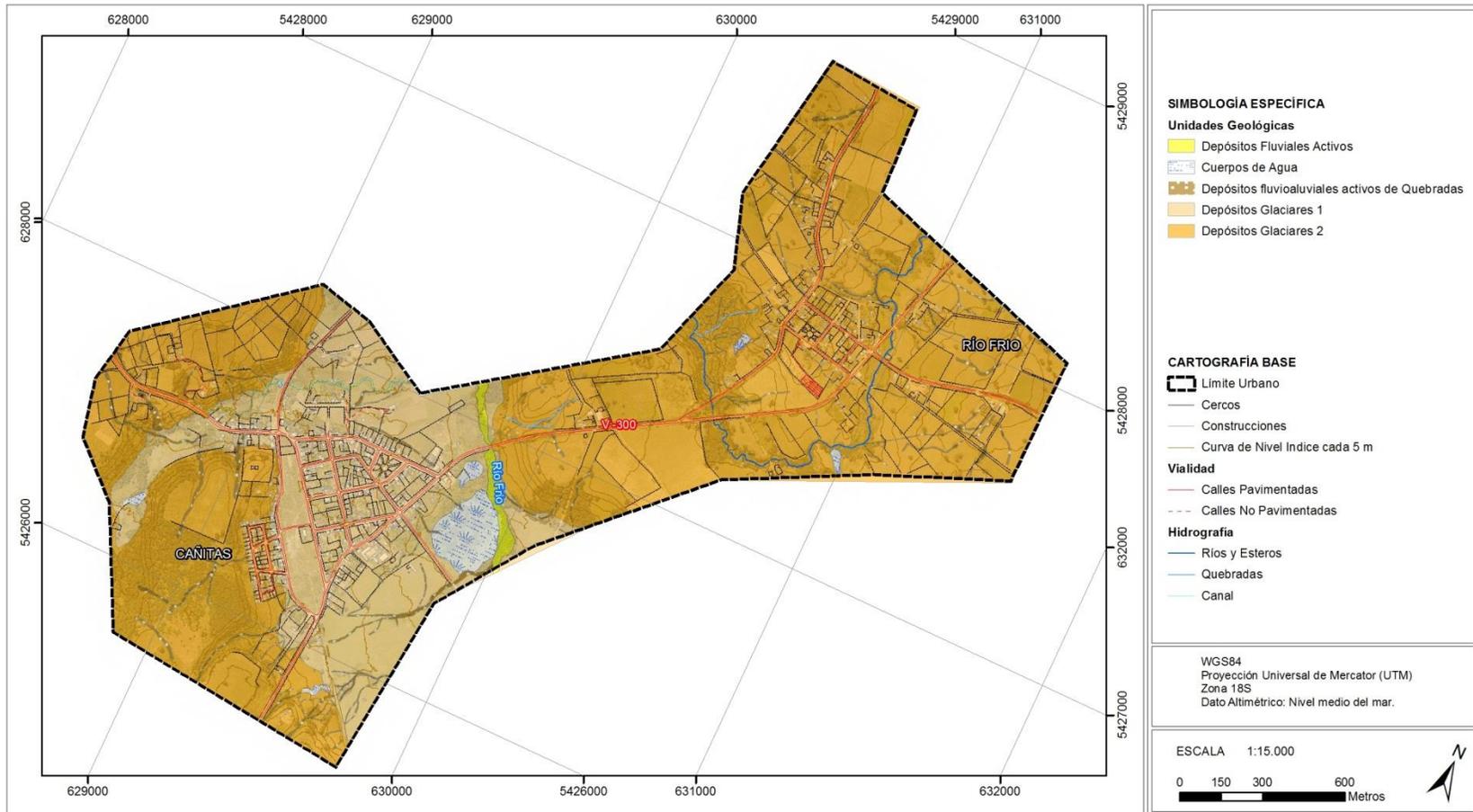
Según el informe del SERNAGEOMIN (2008), el poblado de Los Muermos se dispone sobre un acuífero que varía entre confinado, semiconfinado y libre cubierto. El sistema en Cañitas se establece como un acuífero libre, y Río Frío se ubica sobre un acuífero de gravas con matriz de arcillas con muy baja permeabilidad

FIGURA N° 4-11 Geología del área Los Muermos



Fuente: Elaboración Propia a partir de SERNAGEOMIN (2003) y SERNAGEOMIN-GORE Los Lagos (2008)

FIGURA Nº 4-12 Geología del área Cañitas – Río Frio



Fuente: Elaboración Propia a partir de SERNAGEOMIN (2003) y SERNAGEOMIN-GORE Los Lagos (2008)

5. INVENTARIO PRELIMINAR DE PELIGROS GEOLÓGICOS

En base a la revisión bibliográfica, se realizó un inventario de peligros geológicos reconocidos en el área de estudio o en sectores cercanos a ésta. Para el sector específico de la Comuna de Los Muermos, se desconocen antecedentes bibliográficos que den cuenta de un registro histórico de eventos geológicos tales como volcanismo, sismicidad, inundaciones, sin embargo, existen referencias de sectores aledaños dentro de la Provincia de Llanquihue, así como cercanos a ella, que dan indicios de las características de estos eventos geológicos, tal como se detalla a continuación, excepto de remociones en masa, de las que no se dispone información bibliográfica al respecto.

5.1 *Volcanismo*

El catastro de volcanismo se realizó a partir de la recopilación bibliográfica de los textos de Petit-Breuilh (1995), y González-Ferrán (1995). Como ya se ha mencionado en el capítulo Marco Conceptual, Chile se dispone en la franja de Fuego del Pacífico, por lo tanto gran porcentaje del territorio chileno es afectado o puede llegar a ser afectado por erupciones volcánicas.

En particular, el área de estudio, si bien es cierto no se dispone dentro de la Zona Volcánica Sur (ZVS) (), la cual se encuentra a lo largo de 1400 km del margen mencionado, desde los 33.4° (Volcán Tupungatito) a los 45.9° (Volcán Hudson), también puede ser afectada por la actividad volcánica más cercana. En relación a la ZVS, esta consta de alrededor de 60 volcanes activos durante el Holoceno (Siebert & Simkin, 2002); limita al norte con el segmento de subducción de bajo ángulo, que ha sido atribuida a la subducción del ridge de Juan Fernández (Stern, 2004), mientras que al sur con la subducción del Chile Rise, donde se juntan 3 placas: Nazca, Antártica y Sudamericana. González-Ferrán (1995) identificó 1334 centros eruptivos en esta zona y se estima que cerca del 70% de la población de Chile reside en ella.

Para la evaluación de los riesgos volcánicos se ha considerado los volcanes que se encuentran en un radio de 100km desde la zona de estudio. Para realizar el catastro histórico de volcanes y erupciones volcánicas ocurridas en el área de estudio se consideraron los centros volcánicos activos o potencialmente activos ubicados entre los 40.55° y 42.5° S y sus depósitos asociados. Dentro de este segmento se encuentran los volcanes Puntiatago, La Picada, Osorno, Cordón Los Cenizos, Calbuco, Hualaihué o Apagado, Yate, Hornopirén, Huequi y Cayutué-La Viguería. Las erupciones históricas identificadas a partir de la recopilación bibliográfica se presentan en el CUADRO N° 5-1.

Cada uno de los centros eruptivos considerados se describe a continuación.

5.1.1 *Volcán Puntiatago*

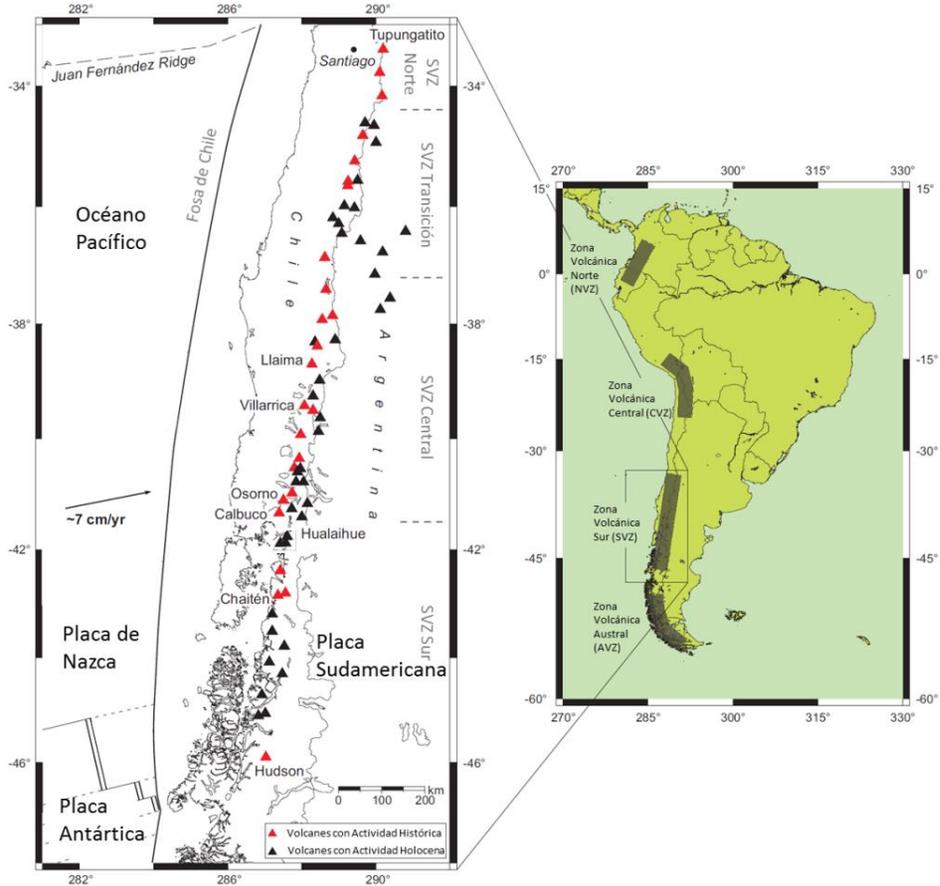
Corresponde a un estrato volcán de edad Pleistocena. Su cuello se caracteriza por estar constituido por brechas y aglomerados volcánicos muy inestables que pueden generar avalanchas de rocas. La composición corresponde a basaltos andesíticos. Dentro de este complejo se encuentra la Fisura Cordón Los Cenizos (González-Ferrán, 1995).

5.1.2 *Cordón Los Cenizos*

Corresponde a tres fisuras paralelas del complejo eruptivo Puntiatago, con rumbo N55°E y una longitud de 20km, de edad inter y post glacial.

Se compone de 41 centros eruptivos que han generado flujos de lavas y conos piroclásticos. Su composición es basáltica de olivino (González-Ferrán, 1995).

FIGURA N° 5-1 Mapa General de la Zona Volcánica Sur



Fuente: Modificado de Watt (2010)

CUADRO N° 5-1 Registro histórico de principales erupciones volcánicas históricas

Volcán	Producto Volcánico	Fecha erupción	Referencia
Puntiagudo	-	07-04-1930	Urrutia & Lanza, 1993
Cordón Cenizos	Explosiones	1850	Petit-Breuilh, 1995
	Erupción Estromboliana	Fines de 1892	Petit-Breuilh, 1995
	Explosiones con emisión de cenizas	04-1924	Petit-Breuilh, 1995
	Explosiones con emisión de cenizas	1930	Petit-Breuilh, 1995

Volcán	Producto Volcánico	Fecha erupción	Referencia
Calbuco	Explosiones	26-11-1834	Petit-Breuilh, 1995
Calbuco	Erupción estromboliana	11-1837	Petit-Breuilh, 1995
Calbuco	Erupción pliniana que duró más de un año. Daños en Puerto Varas, Puerto Montt y alrededores del lago Llanquihue a causa de las emisiones prolongadas de pómez	03-02-1893 (hasta 1895)	Petit-Breuilh, 1995
Calbuco	Erupción explosiva, con emisión de Tefra, formación de Lahares calientes	16-11-1894	González-Ferrán, 1995
Calbuco	Explosiones con emisión de cenizas	1903	Petit-Breuilh, 1995
Calbuco	Explosiones con emisión de cenizas	1906	Petit-Breuilh, 1995
Calbuco	Explosiones freatomagmáticas	04-1909	González-Ferrán, 1995
Calbuco	Explosiones con emisión de cenizas	11-1911	Petit-Breuilh, 1995
Calbuco	Erupciones fuertemente explosivas que dieron origen a lahares calientes.	04-02-1917	Petit-Breuilh, 1995 González-Ferrán, 1995
Calbuco	Explosiones	1922	Petit-Breuilh, 1995
Calbuco	Erupción explosiva con generación de flujos de piroclastos.	06-01-1929	Petit-Breuilh, 1995
Calbuco	Erupción explosiva con generación de flujos de piroclastos.	06-01-1929	Petit-Breuilh, 1995
Calbuco	Erupción estromboliana	12-1932	Petit-Breuilh, 1995
Calbuco	Erupción estromboliana	19-02-1945	Petit-Breuilh, 1995
Calbuco	Erupción pliniana	25-01-1961	Petit-Breuilh, 1995
Calbuco	Erupción estromboliana	26-08-1972	Petit-Breuilh, 1995
Osorno		1640	Petit-Breuilh, 1995
Osorno		1644	Petit-Breuilh, 1995
Osorno	Erupción estromboliana	1719	Petit-Breuilh, 1995
Osorno	Erupción estromboliana	1759	Petit-Breuilh, 1995
Osorno	Erupción estromboliana	1765	Petit-Breuilh, 1995
Osorno	Erupción estromboliana	1778 (Fines)	Petit-Breuilh, 1995

Volcán	Producto Volcánico	Fecha erupción	Referencia
Osorno	Erupción estromboliana en la que se emitió una colada de lava y lahares hacia el lago Todos los Santos	1790-03-09/1791	Petit-Breuilh, 1995
Osorno	Erupción estromboliana	1792	Petit-Breuilh, 1995
Osorno	Erupción estromboliana	1796	Petit-Breuilh, 1995
Osorno	Erupción estromboliana	26-11-1834	Petit-Breuilh, 1995
Osorno	Por su parte, el volcán Osorno aumentó su actividad explosiva y emitió una gran colada de lava y lahares hacia el lago Llanquihue.	20-02-1835	Petit-Breuilh, 1995
Osorno	Erupción estromboliana con emisión de lava	1836	Petit-Breuilh, 1995
Osorno		1837-11-07	Petit-Breuilh, 1995
Osorno	Explosiones freatomagmáticas	1852-11	Petit-Breuilh, 1995 González-Ferrán, 1995
Osorno	Explosiones con emisión de cenizas	1855-06	Petit-Breuilh, 1995
Osorno	Explosiones freatomagmáticas	1869	Petit-Breuilh, 1995 González-Ferrán, 1995
Hornopirén		1742	Petit-Breuilh, 1995
Hornopirén	Erupción estromboliana	1835	Petit-Breuilh, 1995
Huequi	Violenta erupción freatomagmática, con emisión de tefra que cubrió desde las islas Chanque hasta Argentina.	1890	González-Ferrán, 1995
Huequi	Eyección de flujos de lava y formación de cono de piroclastos	1893	González-Ferrán, 1995
Huequi	Explosiones freatomagmáticas	1896	González-Ferrán, 1995
Huequi	Explosiones freatomagmáticas	1900	González-Ferrán, 1995
Huequi	Explosiones freatomagmáticas	1906	González-Ferrán, 1995
Huequi	Explosiones freatomagmáticas	1907	González-Ferrán, 1995
Huequi	Explosiones freatomagmáticas	1920	González-Ferrán, 1995

Fuente: Elaboración propia

5.1.3 *Volcán Osorno*

Estratovolcán que se constituye por un primer edificio volcánico de lavas basálticas y piroclastos, de edad Pleistoceno Superior-Holoceno. Una fase posterior eruptiva ha formado una caldera y dos domos dacíticos, para luego constituirse un nuevo edificio volcánico compuesto de lavas basálticas a andesíticas. Durante tiempos históricos ocurren una serie de erupciones parásitas en torno a su base, emitiendo flujos de lava andesítica-basáltica y piroclastos. El volcán Osorno en 1835 se reactiva emitiendo a través de una fisura de rumbo noroeste formándose 6 conos piroclásticos y flujos de lava andesítica-basáltica (González-Ferrán, 1995).

5.1.4 *Volcán Calbuco*

Es un estrato volcán compuesto que inicia su fase eruptiva en el Pleistoceno Superior. El macizo volcánico inicial, el cual fue fuertemente erosionado por glaciares, se construyó a partir de abundantes flujos de lavas andesíticas, andesíticas-basálticas, que habría alcanzado unos 2000m de altura.

Un segundo ciclo eruptivo emite grandes volúmenes de lavas y piroclastos, generando un nuevo estrato como. El tercer ciclo eruptivo da cuenta de actividad en el Holoceno, con grandes emisiones de lavas y piroclastos andesíticos y andesíticos basálticos. Desde la formación de este volcán se han sucedido deslizamientos gravitacionales y flujos laháricos que han afectado principalmente el sector ubicado al norte de este estratovolcán (González-Ferrán, 1995).

Posee una actividad histórica que se detalla en el CUADRO N° 5-1

5.1.5 *Volcán Hualaihué o Apagado*

Corresponde a un estrato volcán con una caldera de explosión, cuya estructura cratérica alcanza unos 6 km de diámetro, abierta hacia el suroeste. Parte de la explosión lateral habría dispersado los fragmentos en abanico hacia el oeste y suroeste, sobre la península comprendida entre Aulén y Caleta Hualaihué. La actividad post-caldera corresponde a la formación de dos conos de piroclastos, acompañado de un pequeño flujo de lava de composición basáltica (51.42% de sílice). Su edad sería Holoceno-Reciente y no se encontraron reportes de actividad volcánica histórica (González-Ferrán, (1984); López-Escobar et al, (1993); González-Ferrán, 1995).

5.1.6 *Volcán Yate*

Es un estratovolcán compuesto de seis centros eruptivos fisurales (López-Escobar, et al., 1991), controlados por una fractura de rumbo de N25°W. Presenta flujos de lava y piroclastos de composición basáltica. La actividad más reciente se concentra en dos centros adventicios, localizados al noroeste y al oeste, de los cuales han ocurrido flujos de lava andesítica basáltica. El edificio volcánico se encuentra cubierto de hielo y de él descienden importantes glaciares (González-Ferrán, 1995). Muestra evidencia de tener desarrollo de calderas durante el Pleistoceno (López-Escobar, et al., 1993).

5.1.7 *Volcán Hornopirén*

Corresponde a un estratovolcán de lavas y piroclastos basálticos (González-Ferrán, 1995) altamente controlado por la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui. Antecedentes históricos señalan que habría presentado una erupción en 1835 y 1872 (Darwin (1938); Hantke, 1975).

5.1.8 *Volcán Huequi*

Es un estrato volcán ubicado en el sector central de la península homónima, con un cráter de unos 800 m de diámetro. En su interior anida un cono central de lavas y piroclastos andesíticos-basálticos (58.66% de sílice, González-Ferrán, (1995)) y presenta múltiples domos poco erosionados (Watt, et al., 2011a)

De acuerdo a Watt et al. (2011a) sus tipos de erupción y características mineralógicas y geoquímicas son poco comunes a nivel regional. Sus magmas son de composición andesítico-basáltica a dacítica y las rocas eruptadas por este volcán son pobres en K, ricas en Al (si se les compara con rocas asociadas a otros centros volcánicos de la parte sur de la ZVS) y presentan fenocristales euhedrales de anfíbola.

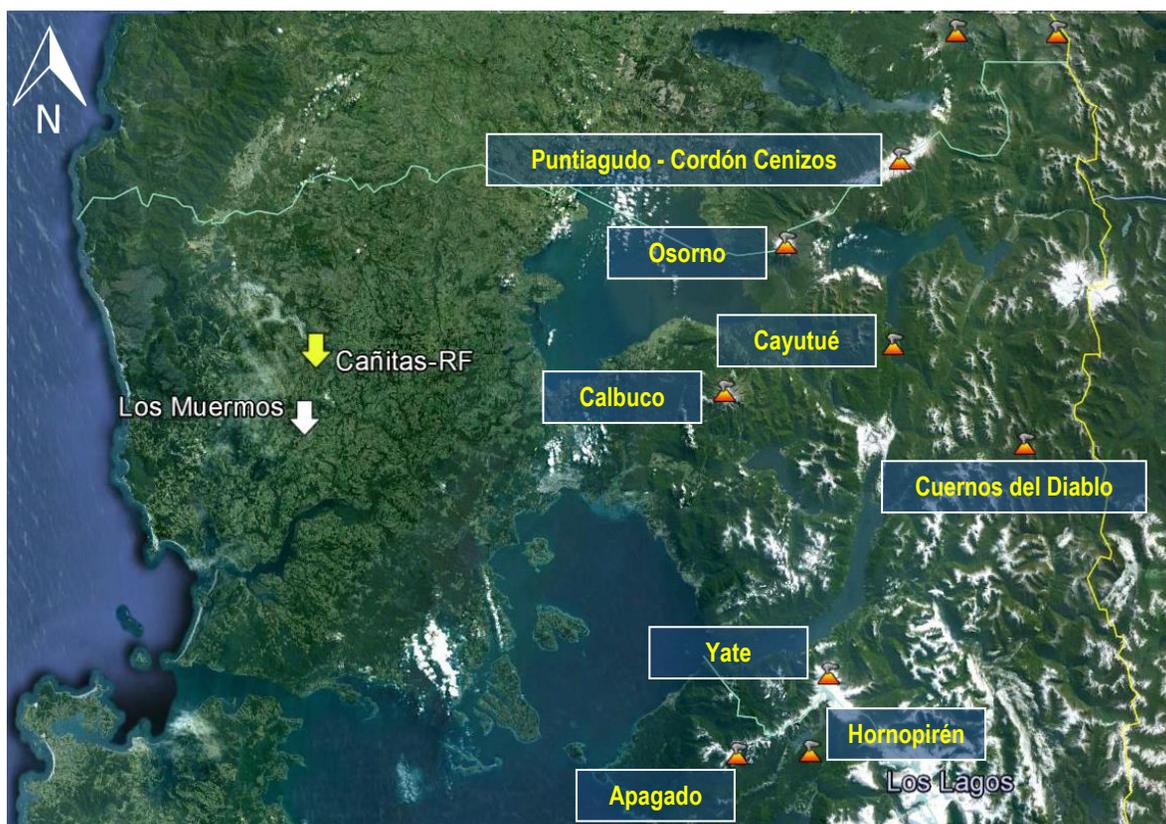
Casertano (1963) asocia a este volcán erupciones en los años 1893, 1906 y 1907. En la misma línea, Watt et al. (2011a) señala que las erupciones estuvieron acompañadas por una actividad explosiva secundaria, siendo las más recientes entre 1890 y 1920, lo que probablemente corresponda a un ciclo eruptivo completo.

5.1.9 *Volcán Cayutué-La Viguera*

Con una altitud de 506 m.s.n.m, el área volcánica Cayutué-La Viguera corresponde a un nido de centros eruptivos monogenéticos ligados a la actividad de la falla Liquiñe-Ofqui, con alineación en dirección NNE y SSO. Una decena de cráteres y conos de piroclastos asociados a extensos flujos de lava basáltica, han rellenado la depresión de la Ensenada de Cayutué hacia el sur, por unos 18 Km, separando el lago Todos los Santos de la Bahía de Ralún. Su edad se estima post-glacial y se estima que la última erupción se produjo aproximadamente en 1050 de la era cristiana.

En la FIGURA N° 5-2 se ubican los principales volcanes de la zona de estudio explicados en este apartado.

FIGURA N° 5-2 Ubicación de los principales volcanes de la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia.

5.1.10 Diagnóstico General del Peligro Volcánico Inventariado

Los 9 centros volcánicos considerados en el área de estudio son predominantemente andesíticos, basálticos y andesítico-basálticos. Las dacitas son menos abundantes.

De los 9 centros volcánicos estudiados, 7 de ellos presentan actividad registrada históricamente. En el resto de los volcanes, si bien no existen antecedentes históricos, el registro geológico y sus rasgos geomorfológicos indican que han tenido actividad durante el Holoceno (últimos 11.000 años). Todos estos volcanes corresponden a centros eruptivos activos, los que además se asocian directamente con la actividad del Sistema de Falla Liquiñe-Ofqui.

5.2 Sismicidad

La costa oeste de Sudamérica está delineada por el borde oriental de la placa tectónica Sudamericana y se caracteriza por su sismicidad debido a su encuentro con la placa tectónica de Nazca. Estos aspectos producen un alto nivel de acoplamiento mecánico en la zona de contacto, permitiendo la acumulación de grandes niveles de energía que ocasionan grandes terremotos, generando una banda sísmica activa muy angosta (100-150 kilómetros de ancho) y profundidad variable (entre 5 y 150 Km. de profundidad) entre el cordón montañoso de los Andes y la fosa Perú-Chile. En la zona de estudio, el contacto entre ambas placas se extiende hasta alrededor de los 40 - 53 km de profundidad (Tassara, et al., 2006). La costa de Chile

históricamente ha sido afectada por grandes terremotos, varios acompañados de maremotos destructivos. En la FIGURA N° 5-3 se grafican los más importantes sismos de subducción que han ocurrido en el período histórico.

El área de estudio posee antecedentes históricos de grandes terremotos interplaca tipo thrust, por ejemplo, los terremotos 1575, 1737, 1837 y 1960, tal como se observa en la FIGURA N° 5-4.

En la bibliografía también se registran sismos en los años 1633 y 1907, que afecta la zona, pero de los cuales se desconocen datos de magnitud (CUADRO N° 5-2).

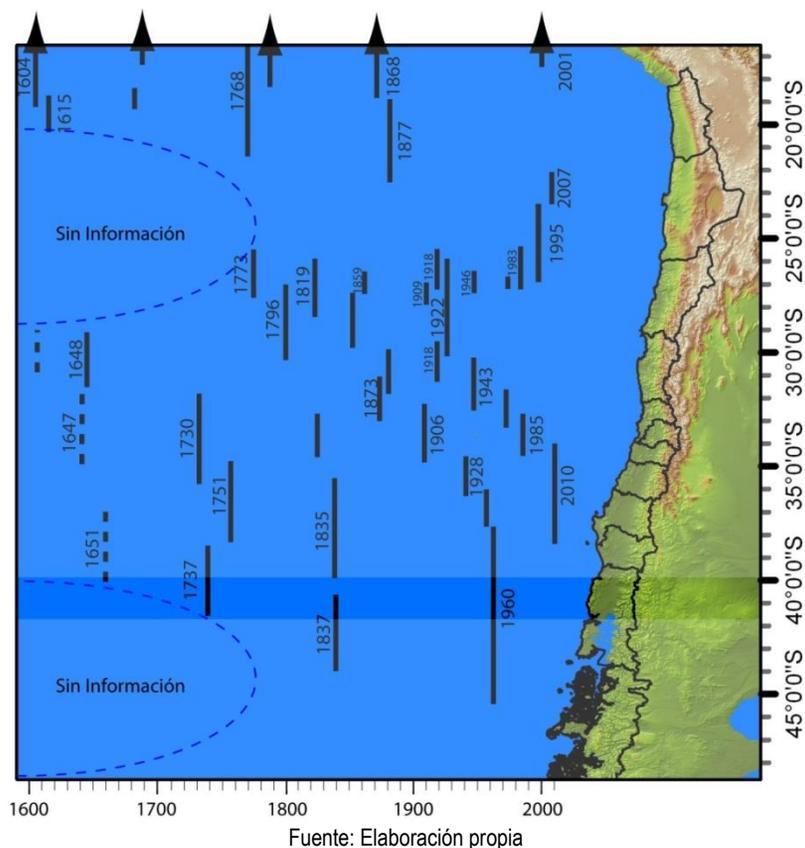
CUADRO N° 5-2: Datos de terremotos de magnitud desconocida ocurridos en la zona.

Latitud	Longitud	Profundidad	Intensidad Aprox.	Año	Mes	Día	Lugar	Efectos
39° - 42°	-	-	I: IX-X	1633	05	14	Valdivia-Castro (Carelmapu)	Concepción hasta Valdivia. Ruina en las construcciones del fuerte de Carelmapu
39°-41°	-	-	I: VIII	1907	06	13	Valdivia-Foco en Temuco.	Daños en Valdivia y Gorbea, 2 muertos. Sentido en Castro, Ancud y Santiago

Fuente: Elaboración propia

Los principales eventos sísmicos de interplaca que han afectado al área de estudio se detallan a continuación y se resumen en el CUADRO N° 5-3.

FIGURA N° 5-3: Terremotos de subducción históricos con magnitud estimada y calculada mayor a 7.2, y sus áreas de ruptura. En línea continua las zonas de ruptura bien identificadas, en línea discontinua las zonas de ruptura inferidas a partir de datos históricos.



- **1575:** Diciembre 16, hora y media antes de la media noche, la ciudad de Valdivia fue semidestruida por un terremoto de gran intensidad que abarcó la amplia zona comprendida entre Villarrica y Castro. La ola que produjo el maremoto subió por el río hasta Valdivia, provocando la muerte de 100 personas en la Bahía de Corral y Valdivia. Los derrumbes de los cerros obstruyeron el cauce del río Calle Calle y al romperse la represa, el agua desbordó sobre los poblados.
- **1737:** El 24 de diciembre, la plaza de Valdivia fue asolada por un gran terremoto, razón por la cual se pensó trasladar los fuertes. La zona afectada llegó hasta Castro.
- **1837:** El 7 de noviembre, a las 8:05, un terremoto afectó Valdivia, Osorno y Ancud, ocasionando un tsunami transpacífico en el cual se registraron 6 m de run up en Hilo (Hawaii), 2 m en la Isla de Mancera, cerca de Valdivia.
- **1960:** El 22 de mayo ocurre el más grande evento registrado en la historia sismológica moderna, alcanzando una magnitud de momento igual a 9.5, largo de ruptura estimado en cerca de 1000 kilómetros, un deslizamiento estimado en 30 metros (Madariaga, 1998) y reveló que los valores extremos elevación fueron de 6 m en la Isla Guambin y de 2 m de hundimiento en la ciudad de Valdivia. Como consecuencia, este terremoto generó un tsunami que arrasó prácticamente todas áreas costeras, desde la Península de Arauco a la Isla de Chiloé, llegando a Japón cerca de 23

horas después. Una clara evidencia de que el terremoto de 1960 no rompió la zona al Norte de la península de Arauco es que una serie de sismos de magnitud cercana a 7.5 se produjeron en esta región entre 1974 y 1975. 38 horas después de este mega terremoto tipo thrust, se inició la actividad del Complejo Volcánico Puyehue Cordón Caulle.

CUADRO N° 5-3: Datos de terremotos de magnitud superior a 7.0 ocurridos en la zona.

Latitud	Longitud	Profundidad	Magnitud	Año	Mes	Día
-73.20	-39.80	-	8.9	1575	12	16
-73.20	-39.80	-	7.9	1737	12	24
-73.20	-39.80	-	8.3	1837	11	7
-73.50	-37.50	-	7.3	1960	5	21
-73.00	-37.50	-	7.4	1960	5	22
-73.50	-38.00	-	7.3	1960	6	20
-75.10	-38.50	55	7.4	1960	11	1

Fuente: Elaboración propia en base a Urrutia y Lanza (1993).

Los terremotos previos a 1960 no poseen información instrumental que permita determinar sus características, por lo que, utilizando datos de intensidad de daño, se estiman las áreas de ruptura de estos terremotos, utilizando la metodología propuesta por Kausel & Ramírez (1992) El área de ruptura para cada uno de estos sismos históricos se presenta en la FIGURA N° 5-4, mientras que los epicentros propuestos se muestra en la FIGURA N° 5-5. Como se aprecia el área de ruptura de los terremotos interplaca tipo thrust corresponde a la zona costera, estando lejos del lugar de estudio. La ubicación de estos terremotos históricos y la distancia a la que se encuentran de la zona del proyecto, es considerada en la definición del terremoto de diseño.

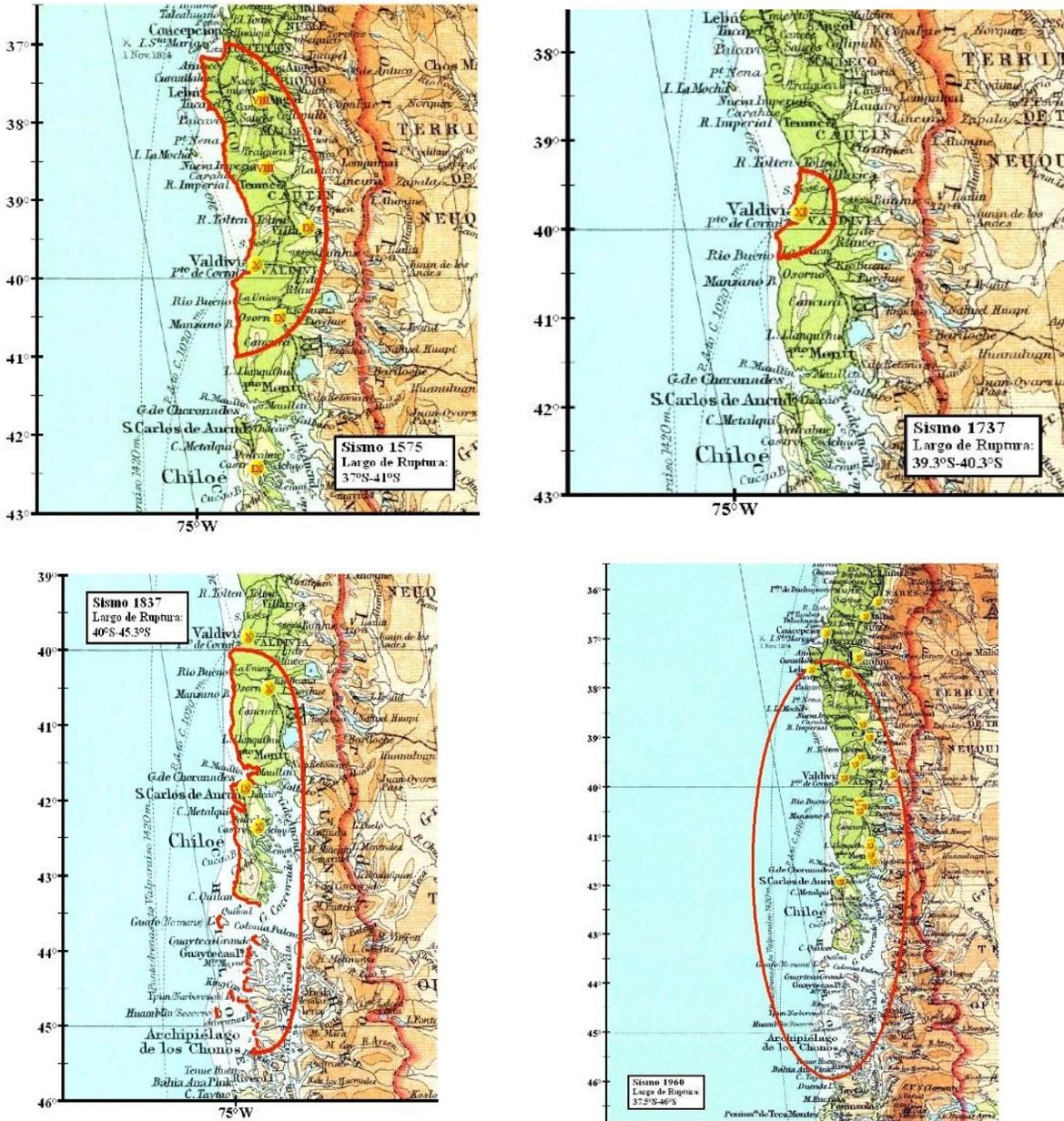
Aunque se registran fuera del área de estudio, se ha registrado actividad sísmica, asociada a la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui, la más destacable ha sido la relacionada al enjambre sísmico del año 2007. Que tuvo sus eventos más importantes en Abril. Su inicio ocurrió el 23 de Enero de 2007 con un sismo $M_w = 5.2$ (USGS), el cual tuvo gran actividad entre el mes de Enero y Abril (con más de 7200 eventos corticales superficiales, a profundidades inferiores que 25 kilómetros). El 21 de Abril ocurrió un sismo considerado terremoto, ($M_w = 6.2$) que generó grandes deslizamientos, entre ellos uno en el sector de Punta Cola y frente a Isla Mentirosa que generó un maremoto local, que tuvo como consecuencias grandes daños a las salmoneras del sector, la muerte de 3 personas y la desaparición de otras 7, ocasionando además grandes volúmenes de remociones en masa en el sector de Punta Cola y frente a Isla Mentirosa.

De acuerdo a un estudio reciente de la distribución temporal y espacial de un cierto número de eventos superficiales, indica un origen tectónico para la actividad sísmica del enjambre, originado por la liberación de esfuerzos de cizalle acumulados por el movimiento del bloque al oeste de la Zona de Falla Liquiñe –Ofqui, generados por la oblicuidad de la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana y la debilidad termal en la zona intra-arco que permite la absorción de esta deformación bajo un régimen de esfuerzo transpresivo. (Mora, 2009).

En la zona de la falla Liquiñe-Ofqui en los últimos 40 años se han registrado, por la red mundial, nueve eventos de magnitudes entre 5.2 y 6.2 ubicados a lo largo de la traza de la falla, pero la baja precisión en profundidad de la ubicación de los hipocentros no permite asignar directamente estos eventos a la falla.

Un estudio que contó con una red sismológica local ubicada en la isla de Chiloé y la región continental de Chaitén, cubriendo aproximadamente entre los 41.5°S y los 43.5°S (Lange, 2008), registró setenta y cinco sismos superficiales, de profundidad menor a 25 km, con magnitudes de hasta M_w 3.8 en los 11 meses en que la red estuvo instalada. Estos sismos se presentaban en forma de cúmulos localizados en la ZFLO principalmente, a actividad en fallas secundarias, y a los volcanes Chaitén, Michinmahuida y Corcovado (Lange, 2008)).

FIGURA N° 5-4: Área de ruptura (encerrado en elipse roja) e intensidad de daño observada para los terremotos de: 1575 (M 8.5), 1737 (M 7.5-8.0), 1837 (M 8.0) y 1960 (M 9.5).



Fuente: Susa, (2004).

5.2.1 Sismos registrados por la red sismológica mundial.

En la FIGURA N° 5-6 se presenta la sismicidad registrada por la red sismológica internacional, con magnitudes superiores a 4.5 (eventos percibidos por la población). Es posible ver como un grupo importante de eventos se localizan próximos al contacto entre las dos placas; estos eventos sísmicos son denominados como interplaca o thrust (dado su bajo ángulo de manteo). Además, se aprecia una gran cantidad de eventos que ocurren al interior de la placa de Nazca, lejos del contacto, a profundidades superiores a 50 km; a este conjunto de eventos se les conoce como intraplaca de profundidad intermedia. También es posible observar, en mucho menor medida, sismos superficiales en la placa Sudamericana, cerca de la Cordillera de Los Andes, correspondiendo a sismos corticales cordilleranos (profundidades inferiores a 25km).

FIGURA N° 5-5: Mapa topográfico con los eventos históricos de magnitud superior a 7.0 ocurridos en la zona. La información de los terremotos se presenta en el CUADRO N° 5-3

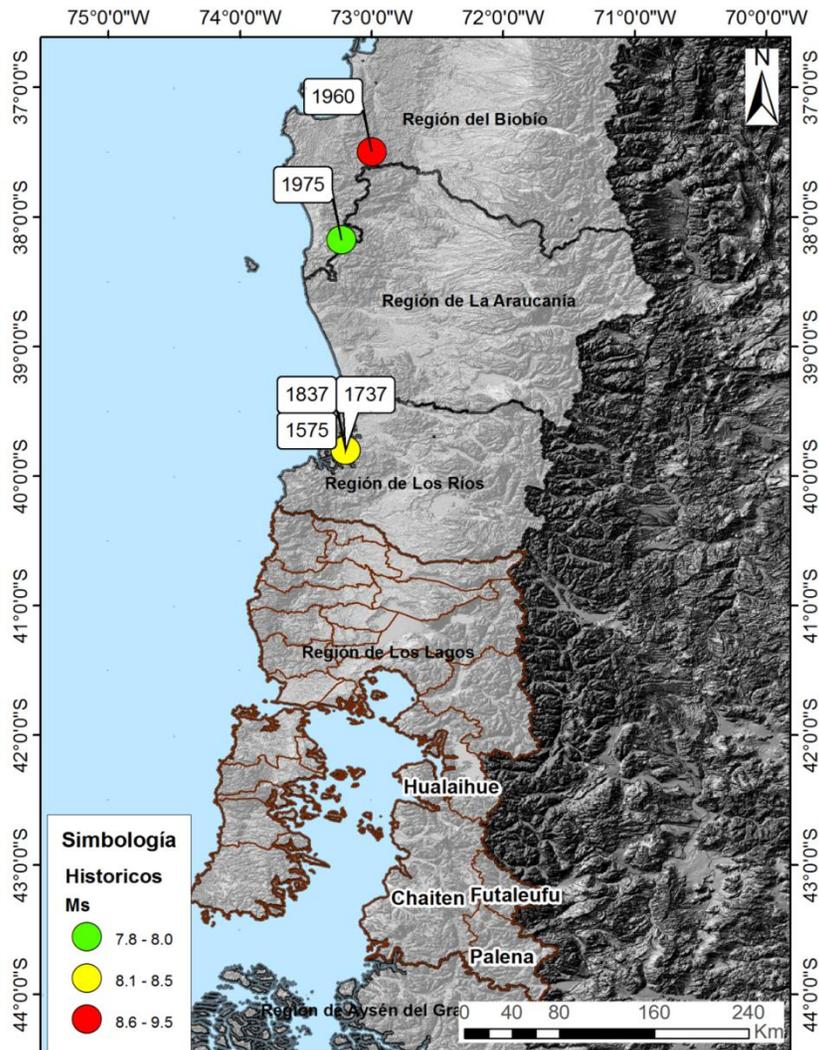
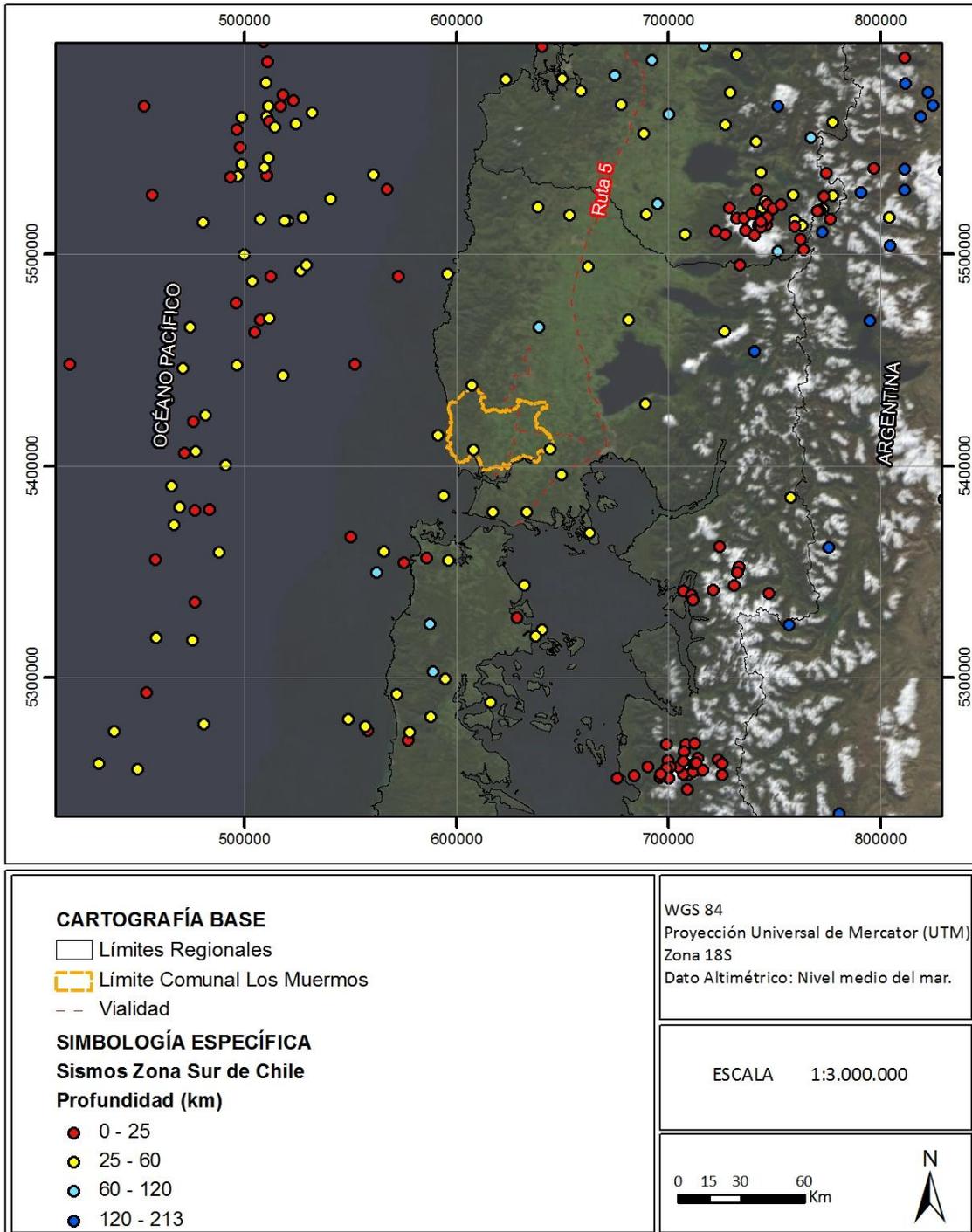


FIGURA N° 5-6: Mapa regional con la sismicidad dominante del área de estudio



Fuente: Elaboración propia

5.2.2 Principales fuentes sísmicas reconocidas en el área de estudio.

En el área de estudio se reconocen tres fuentes sismogénicas principales, las cuales son: interplaca tipo thrust, intraplaca de profundidad intermedia y eventos corticales (ver FIGURA N° 3-3 en el Capítulo 3.1.1).

5.2.2.1 Sismos Interplaca tipo Thrust

Corresponden a aquellos eventos que se producen en el contacto entre las placas de Nazca y Sudamericana (ver FIGURA N° 3-3 en el Capítulo 3.1.1), producto de los esfuerzos comprometidos en el proceso de la subducción. Este tipo de eventos alcanzan grandes magnitudes y son aquellos poseen potencial de generar maremotos. La zona de estudio se ha visto afectada por este tipo de sismo, por ejemplo el terremoto de 1960.

5.2.2.2 Sismos Intraplaca de Profundidad Intermedia

Esta fuente corresponde a los sismos que ocurren en el interior de la placa de Nazca, a continuación de la zona de acople; alcanzando profundidades mayores de 50 km y hasta los 150 -200 km. (FIGURA N° 3-3 en el Capítulo 3.1.1)

La zona de estudio no ha sido afectada en períodos históricos por terremotos del tipo intraplaca de profundidad intermedia de magnitud importante, por lo que se presentan registros de eventos ocurridos en otras localidades, tales como el terremoto de Santiago de 1945 y Punitaqui de 1997.

Otros terremotos intraplaca de profundidad intermedia de gran magnitud ($M \approx 8$) son el de Chillán de 1939 y el de Tarapacá del año 2005, que han sido los terremotos que más daño y mortandad han generado en Chile.

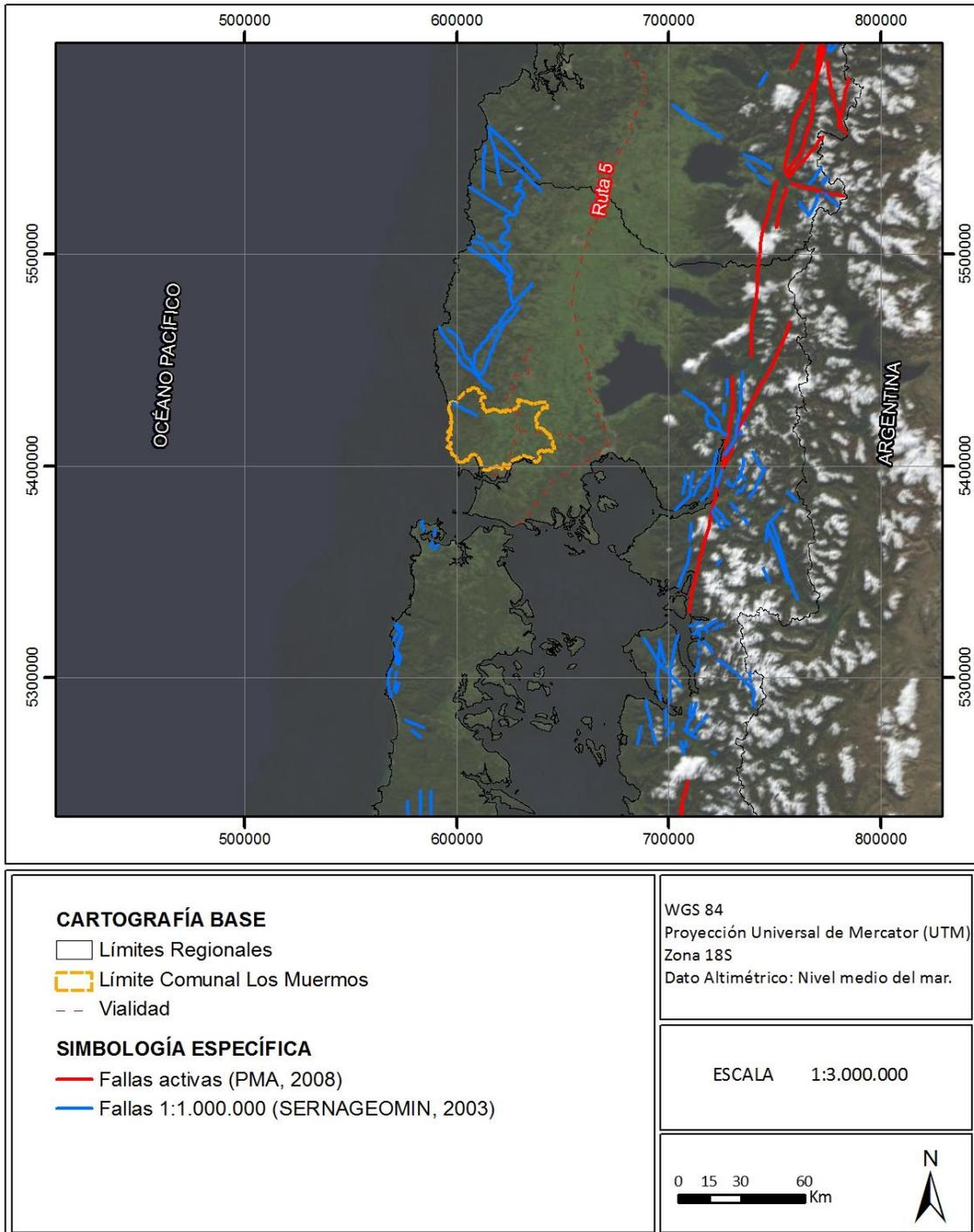
5.2.2.3 Sismos Corticales

La sismicidad cortical está asociada a fallas geológicas activas y a procesos de deformación frágil en la corteza, y en general relacionados en su mayoría a sistemas de fallas inversas, razón por la cual la productividad sísmica de esta fuente no se distribuye espacialmente homogénea. En la FIGURA N° 5-6 se presentaron los focos asociados a sismicidad superficial, los que presentan buena correlación con las fallas corticales activas (actividad en el Holoceno) que se han recopilado de la información existente, pero en la zona de estudio no se han registrado este tipo de sismos, lo que se condice con lo que afirma Lavenu (2005), quien establece que en estas zona no se han reconocido fallas activas.

5.2.3 Estudios previos del Peligro Sísmico en el área de estudio

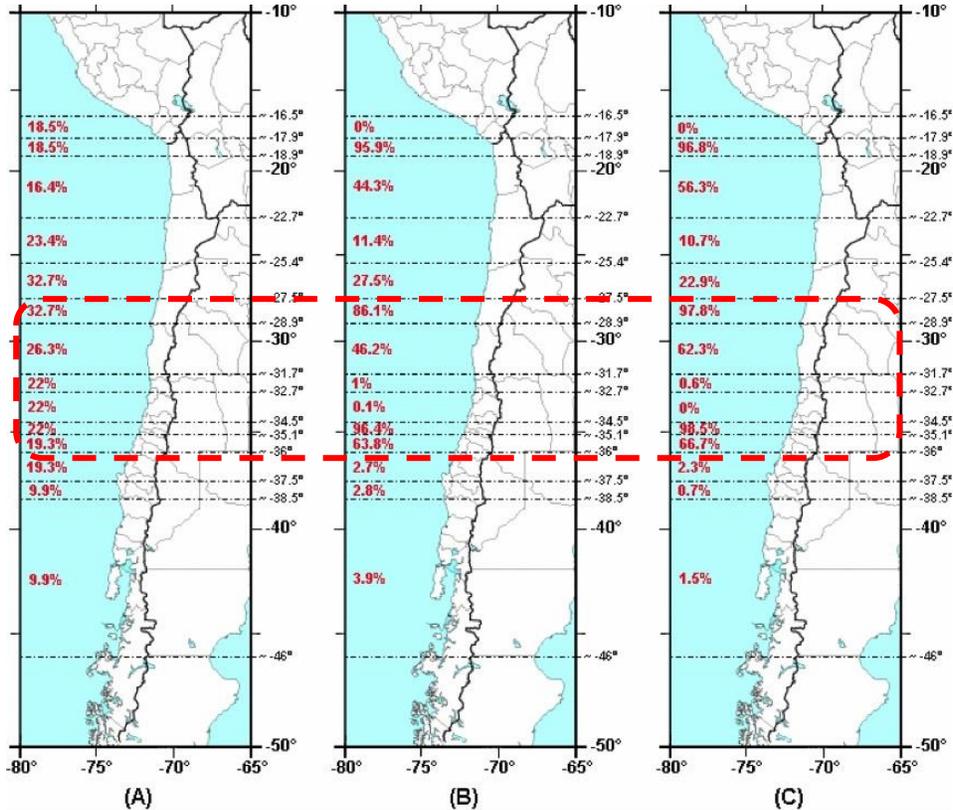
En Chile se han desarrollado investigaciones previas que han estimado el peligro sísmico a diversas escalas de estudio. En primer lugar, se muestran el trabajo realizado por Susa (2004) en los cuales se estimó la probabilidad de ocurrencia de un terremoto de magnitud importante (sobre 7.0-7.5) en diversas regiones de nuestro país (ver FIGURA N° 5-8) dentro de un determinado rango de tiempo. Para la zona en estudio se tiene un rango comprendido en torno al 2% al 10% dependiendo del modelo probabilístico considerado para el análisis de peligro. Cabe resaltar que los dos modelos que entregan menores probabilidades (B y C de la FIGURA N° 5-8) son aquellos en los cuales se toma en cuenta el tiempo transcurrido desde el último gran terremoto, reflejando de mejor manera el ciclo sísmico. En esta zona, el último gran terremoto fue el de Valdivia de 1960 ($M_w=9.5$), por lo tanto Susa propone que existe una probabilidad muy baja que se vuelva a producir un terremoto importante (sobre 7.0 -7.5) en dicha zona para un periodo de tiempo próximo (correspondiente al intervalo 2004 y 2024).

FIGURA N° 5-7 Mapa de fallas activas del área de estudio.



Fuente: Elaboración propia a partir de Lavenu (2005)

FIGURA N° 5-8 Probabilidades de que ocurra un terremoto de magnitud superior a 7.0-7.5 para el período comprendido entre 2004-2024. Para su determinación, se consideraron las siguientes distribuciones: (A) Poisson, (B) Weibull, determinada mediante mínimos cuadrados, y (C) Weibull, determinada mediante máxima verosimilitud (Susa, 2004)

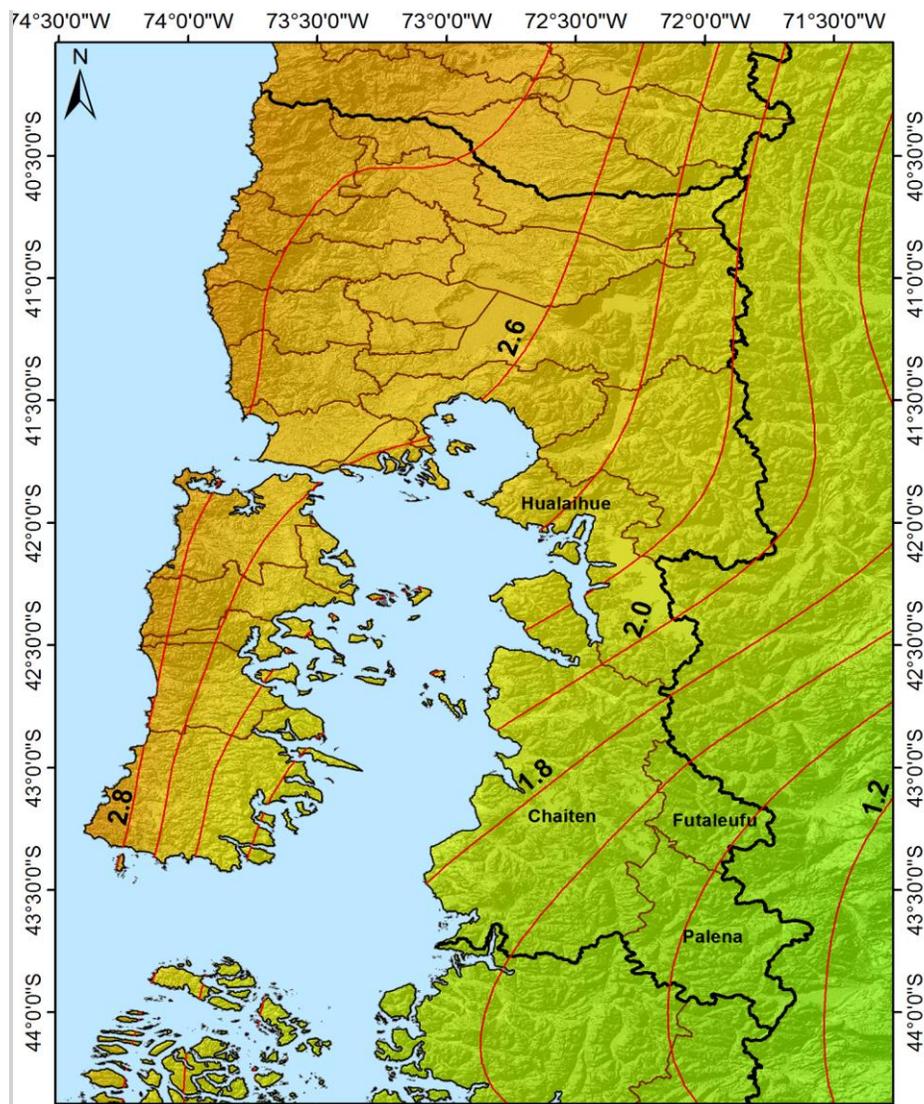


Fuente: Susa (2004)

Por otro lado, el proyecto denominado *Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP)* (Giardini et al., (1992)) desarrollado entre 1992 y 1999, tuvo como objetivo elaborar un mapa a escala global del peligro sísmico expresado en aceleración horizontal (peak ground acceleration, pga). Por ello, se estimó la aceleración máxima en la horizontal para un plazo de vida útil de 50 años considerando un 10% de probabilidad de excedencia (equivalente a un período de retorno de 475 años). Los resultados obtenidos para el área en estudio se presentan en la FIGURA N° 5-9 (ver detalles en texto de la figura)

Para el área cercana a la zona de estudio se tiene una aceleración máxima en la horizontal de 2.6 a 2.8 m/s² (peligro moderado correspondiente a cerca de un 18%g) con un período de retorno de 475 años.

FIGURA N° 5-9 Estimación del peligro sísmico elaborado por el programa GSHAP (Giardini y otros, 1992). La aceleración horizontal máxima (en m/s^2) expresada en las isocintas tiene un 10% de probabilidad de ser excedida en 50 años



Fuente: Elaboración propia

5.2.4 Respuesta sísmica en el emplazamiento

Las diferentes litologías que encontramos en el área de estudio corresponden a depósitos morrénicos, fluvio-glaciales y glacialacustres (SERNAGEOMIN, 2003) y (SERNAGEOMIN-GORE Los Lagos, 2008)). Según SERNAGEOMIN (2008), en la comuna de los Muermos encontramos, a grandes rasgos, dos tipos de suelos o depósitos no consolidados (FIGURA N° 5-11):

- Gravas en matriz de arenas, con escasos lentes de limos y arcillas. Meteorización débil (sector central y NW de la comuna).

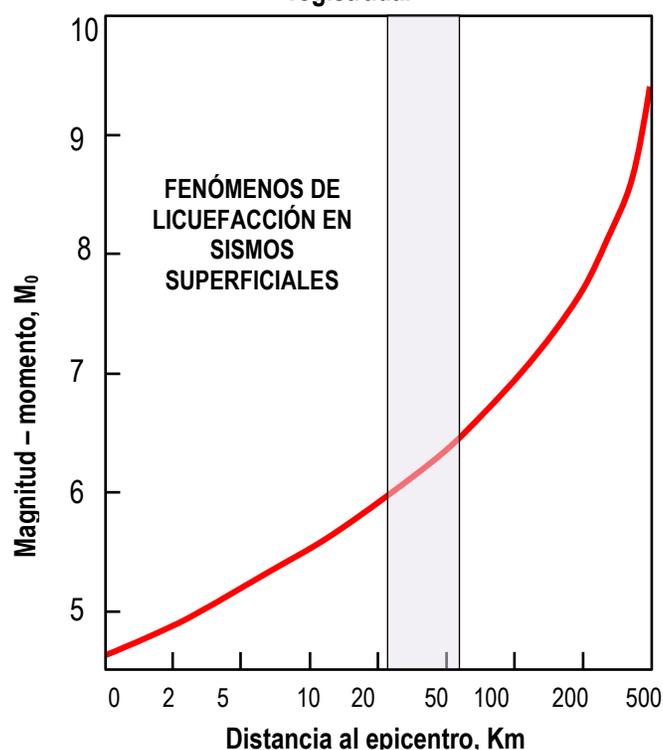
- Bloques y gravas, matriz-soportados, en matriz de limo y arcilla y/o arena fina, compacta y cementada, con intercalaciones de gravas y arenas (sector este y oeste de la comuna).

La naturaleza granular de estos suelos, con empaquetado poco denso, no cohesivo y saturados los hace vulnerables al paso de las ondas sísmica, haciendo que la tensión tangencial cíclica venza la resistencia del esqueleto granular y este cambie a un empaquetado más denso. La velocidad y ciclicidad del fenómeno impiden la expulsión de agua y la presión intersticial aumenta casi instantáneamente, lo que lleva a la deformación y flujo del sedimento con el agua, esto es, a la fluidificación.

Los registros disponibles nos indican que la sismicidad dominante, en la comuna de Los Muermos, se corresponde con sismos superficiales (distancias epicentrales entre 25 y 60 Km). Además, hay registros históricos de sismos de magnitud > 7 en la región. Con estos antecedentes no se descarta la ocurrencia de mala respuesta de sitio en zonas susceptibles. Uno de los efectos de la mala respuesta de sitio podría ser la licuefacción (figura), pero hay que tener en cuenta también los fenómenos de deslizamientos, desprendimientos y roturas..

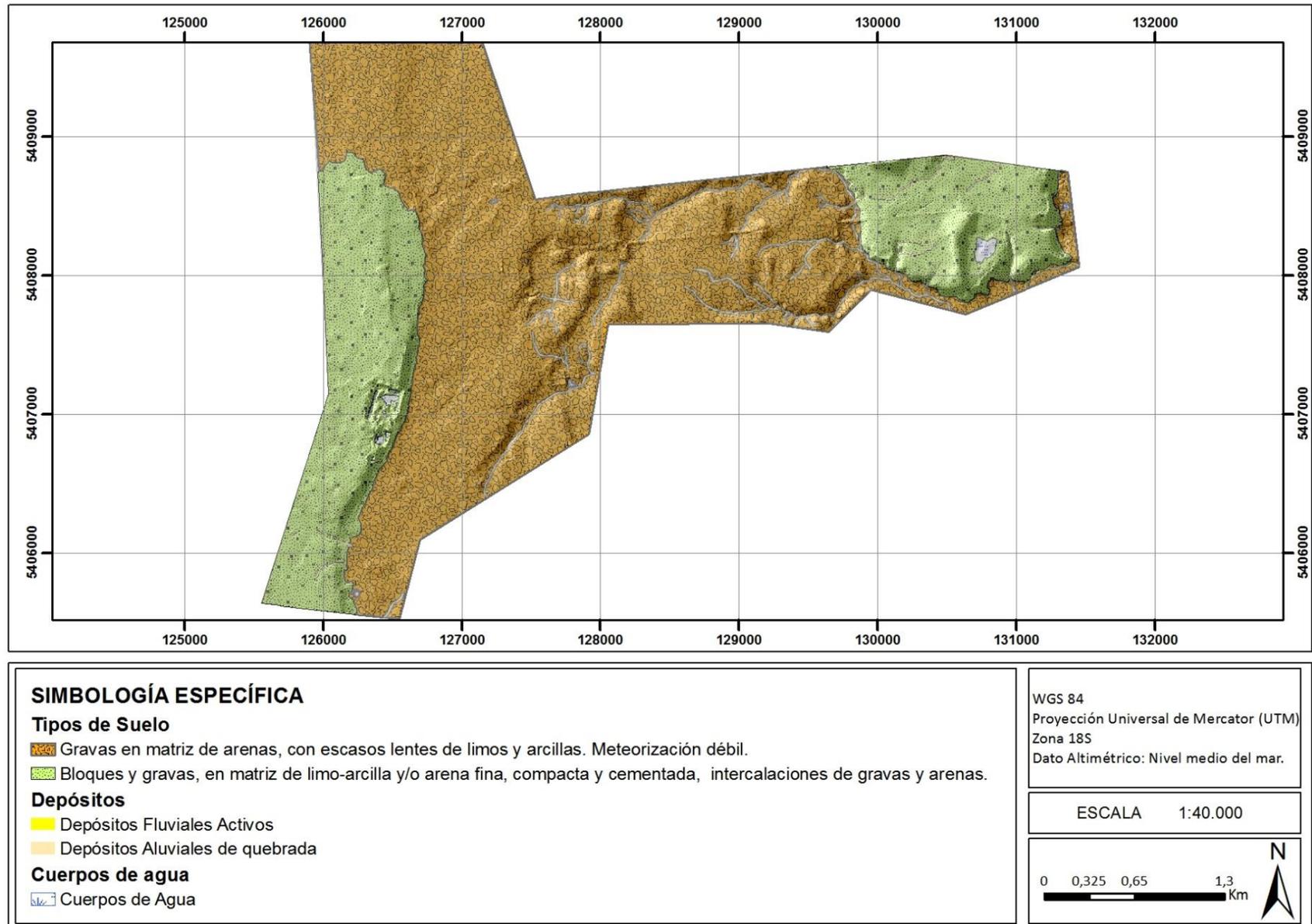
No obstante, se requiere de un estudio en detalle para evaluar la respuesta de sitio que pueden tener las diferentes zonas susceptibles de sufrir licuefacción, deslizamientos, desprendimientos y roturas.

FIGURA N° 5-10 Distancia máxima hasta la que se han observado estructuras de licuefacción en terremotos superficiales, en función de la magnitud del sismo (Obermeier, 1996). La franja de color corresponde a nuestra zona de estudio y se representa en función de la distancia epicentral histórica registrada.



Fuente: Elaboración propia en base a (Obermeier, 1996).

FIGURA Nº 5-11 Tipos de suelos de la comuna de Los Muermos.



Fuente: elaboración propia en base a (SERNAGEOMIN, 2003) y (SERNAGEOMIN-GORE Los Lagos, 2008)

5.3 Inventario de inundaciones terrestres y litorales registradas en el área de estudio

La bibliografía revisada no muestra datos de este tipo de eventos geológicos específicos de la zona de la comuna de Los Muermos. Pero se han registrado eventos en lugares aledaños a la zona de estudio.

- Temporal de 1893:

De acuerdo a la información bibliográfica de Urrutia y Lanza (1993), se describe un evento de inundación para la zona de Puerto Montt en el año 1893. Los cuales se produjeron por fuertes lluvias en la zona. Estas lluvias dejaron intransitables los caminos. Varias personas debieron abandonar sus casas. El área más afectada fue en las cercanías de la laguna Tagua Tagua.

- Temporal de 1922:

En el año 1922 se registra un temporal que azotó desde Concepción hasta Chiloé, provocando desbordes de ríos, temporales de viento, lo que provocó grandes destrozos en las construcciones.

- Temporal de 1929:

Entre el 9 y 10 de agosto de 1929 un fuerte temporal azotó el territorio entre Antofagasta y Puerto Montt. La mayoría de las ciudades sufrieron anegamientos en sectores bajos y fuertes vientos que botaron árboles y postes.

- Temporales de 1934:

Entre el 17 de mayo y 4 de junio de 1934 hubo temporales desde Copiapó y Magallanes, dejando pérdidas humanas, de animales, damnificados, daños en caminos, casas, en puentes y vías férreas.

- Temporales de 1949:

El 19 de mayo de 1949 se inició un temporal de lluvia y viento que azotó al país desde Aconcagua hasta la Antártida. En Puerto Montt se inundaron edificaciones, se rebalsaron los desagües. El lago Llanquihue sepultó ochenta y seis casas.

- Temporales de 1950:

En 1950 durante el mes de junio hubo grandes daños entre Concepción y Puerto Montt, a causa de fuertes lluvias. En Puerto Montt se anegaron calles, casas de los barrios bajos, caminos principales quedaron en pésimo estado, y hubo pérdidas en animales.

- Temporal de 1958:

Afectó la zona comprendida entre Concepción y Chiloé. La más afectada fue esta última. Este temporal produjo daños por desbordes de ríos y esteros que anegaron campos y pueblos. En Chiloé hubo derrumbes e inundaciones.

- Temporales de 1961:

Las fuertes lluvias y vientos afectaron la zona ubicada entre Valparaíso y Ancud. En Puerto Montt se hundió a 15 metros de profundidad el terraplén de la línea férrea, entre Fresia y Pargua. Se inundó la cancha de aterrizaje y pobladores de la localidad de Quillín fueron evacuados.

- Inundaciones de 1970:

Un frente de mal tiempo de más de tres días de duración afectó en julio de ese año a las zonas entre Illapel hasta Puerto Montt. En esta última hubo daños a casas a causa del fuerte viento y lluvia.

- Inundaciones y temporales de 1979:
Lluvias torrenciales, vientos huracanados y nevazones afectaron desde la V región al sur en 1979. En Puerto Montt fuertes lluvias causaron un derrumbe de un cerro que aplastó a un campamento de pescadores de la zona de Corhuín.
- Temporal de 1981:
Entre abril y junio varios frentes azotaron desde el Norte Chico al sur. En Puerto Montt se cortaron vías férreas, y hubo vientos de más de 100km/h.
- Temporal de 1988:
Un temporal que afectó la zona desde Concepción hasta Puerto Montt, dejó puentes y caminos cortados, casas se destruyeron por el desborde de ríos y varias localidades quedaron aisladas.
- Temporal de 1990:
Afectó desde la zona central al sur del país. Fuertes lluvias y vientos de más de cien km/h dejaron viviendas anegadas, dejó puentes y caminos cortados.
- Temporal de 1992:
Un temporal de viento y lluvia se desató en la X región a partir del 19 de febrero. Dejó casas dañadas por inundaciones, cortes de caminos y derrumbes afectaron la zona.

5.4 Inventario procesos de remoción en masa registrados en el área de estudio

La bibliografía revisada no muestra datos de este tipo de eventos geológicos específica de la zona de la comuna de Los Muermos. Pero se ha registrado eventos en lugares aledaños dentro de la provincia de Llanquihue.

Particularmente Weischet (1960) describe, que a raíz del sismo del 21 de mayo de 1960, sucedieron pequeños deslizamientos rotacionales en las riberas del río Maullín en las cercanías de Puerto Toledo. Esto a 15 km de la localidad de Los Muermos.

6. DIAGNÓSTICO Y ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD A LOS PELIGROS GEOLÓGICOS QUE PUEDEN AFECTAR EL ÁREA DE ESTUDIO

Los peligros reconocidos en la zona de estudio se pueden diferenciar en dos grupos:

- Peligros No Zonificables: a escala comunal (escala de trabajo mayor a 1:50.000): casos en los que no se pueden zonificar a escala urbana o que requerirían estudios de mayor detalle para poder determinar una zonificación de la susceptibilidad.
- Peligros Zonificables: a escala comunal (escala de trabajo menor a 1:25.000): casos en los que se puede categorizar la susceptibilidad y por lo tanto determinar una zonificación de la misma (PLANO N°1 y N°2 fuera de texto).

6.1 Peligros No Zonificables

6.1.1 *Peligro Sísmico*

Considerando lo discutido anteriormente se puede concluir que el área de estudio ha sido afectada por sismos importantes, al igual que casi todo Chile. Dado que estos fenómenos son recurrentes y propios de la dinámica de subducción en que se encuentra Chile, no debe descartarse la ocurrencia de grandes sismos en la planificación a mediano y largo plazo. Particularmente para el área de estudio, el resultado del análisis anterior indica que el peligro sísmico del área se debe considerar uniforme, lo que no justifica una zonificación por generación de sismos.

Tanto para los sismos de profundidad intermedia como los sismos corticales, sus características y recurrencias son poco conocidas. Sin embargo, las evidencias recolectadas apuntan a que la zona puede ser afectada por sismos de ambos tipos. Los sismos de profundidad intermedia se registran en todo el país, la mayor parte corresponde a sismos de magnitud pequeña, para la zona los datos sísmicos señalan la ocurrencia de estos sismos, por lo que no se puede descartar un evento de magnitud importante en el futuro. No obstante, hay que remarcar que la zona de estudio se han dado antecedentes históricos de grandes terremotos interplaca tipo thrust, por ejemplo, los terremotos 1575, 1737, 1837 y 1960, tal como se observa en la FIGURA N° 5-4.

Además, por el tipo de suelo que hay en la zona de estudio y los sismos que pueden afectar al área, pueden darse zonas susceptibles a una mala respuesta de sitio.

6.1.2 *Peligro Volcánico*

Los peligros asociados a lavas, al edificio volcánico y a remociones en masa, no se considerarán, ya que el alcance de este peligro es inferior a 10 Km y la zona de estudio se ubica a más de 100 Km de distancia de los principales volcanes susceptibles de afectarla.

El peligro asociado a volcanismo que, con mayor probabilidad, puede afectar el área de estudio es la **caída de tefra**, producto de la erupción de alguno de los volcanes activos ubicados entre los 40° y los 43°S. En erupciones violentas, la tefra puede ser llevada a altas capas de la atmósfera siendo transportadas por el viento y depositándose a centenares de kilómetros, provocando riesgos tales como:

- Formación de una suspensión de partículas de grano fino en el agua y aire.

- Contaminación del agua superficial y muerte de la vida acuática. El recubrimiento químico de la ceniza puede causar un aumento temporal de la acidez del agua que puede durar horas una vez finalizada la erupción.
- Enterramientos y daños estructurales en los edificios debido a la acumulación de ceniza en los tejados(*). Tan sólo 1 cm de ceniza puede colocar 2,5 toneladas extra de peso en una casa promedio con un tejado de 140 m² (Keller & Blodgett, 2004).
- Transporte de gases nocivos, ácidos y sales.

(*) Generalmente, los daños en la vegetación y las techumbres debido a la caída de piroclastos comienzan a presentarse cuando los espesores acumulados alcanzan los 10 cm aproximadamente. Una capa de 10 cm de espesor de ceniza seca pesa de 40 a 70 kilogramos por metro cuadrado. Si esta ceniza está húmeda o llueve, su peso se duplicaría. Debido a esto, la caída de ceniza en grandes cantidades puede acumularse en los techos de las casas y otras construcciones y por su peso hacerlos colapsar. Aún en cantidades menores puede dañar cultivos, los sistemas electrónicos y de comunicación o afectar la alimentación del ganado (Myers, et al., 1997).

Típicamente, al incrementarse la distancia desde el centro de emisión, la tefra presenta una disminución en el tamaño del grano y del espesor de los depósitos.

Cuantificar que volumen de tefra puede afectar a la zona de estudio o cuánto tiempo puede tardar en llegar, desde que se produce la erupción, es extremadamente complicado, ya que depende de múltiples factores tales como: tipo de erupción volcánica, volumen de piroclastos asociados, altura de la columna eruptiva y componente del viento; este último parámetro tiene una gran fluctuación en función del mes del año en el que se produzca la erupción.

En función del tipo de erupción que tengamos, según la escala del índice de explosividad volcánica (VEI), tendremos un volumen de piroclastos asociados y una altura de columna eruptiva (CUADRO N° 6-1).

CUADRO N° 6-1 Escenarios eruptivos considerados para los distintos volcanes. VEI: índice de explosividad volcánica

VEI	3	4	5
Descripción de la erupción	Moderada – grande	Grande	Muy grande
Volumen de piroclasto (m³)	10 ⁷ – 10 ⁸	10 ⁸ – 10 ⁹	10 ⁹ – 10 ¹⁰
Altura de la columna (km)	3 - 15	10 - 25	>25

Fuente: Newhall and Self (1982).

En el “Estudio de riesgos de sismos, volcanismo, remoción en masa, inundación por desborde de cauces y canales” para la comuna de Chaitén, elaborado por Infracon S.A-SUBDERE (2012), se presentaron modelos de la componente del viento en función del mes del año, debido a las variaciones estacionales.

Con la finalidad de estudiar los diferentes patrones de viento predominantes, por estrato, se puede clasificar la dirección en función de la altura a la que llegue la columna eruptiva, tal como se detalla a continuación:

- Los vientos de los niveles estratosféricos (>25 km s.n.m.), presentan una distribución en la cual más de 44% son en dirección desde el Oeste hacia el Este. También se observan vientos en dirección desde el Este al Oeste con un 30% aproximadamente de las veces.
- Los vientos cercanos a la tropopausa (cerca de los 15 km s.n.m.), presentan una distribución principalmente en dirección desde el Oeste hacia el Este (más del 70 %), llegando hasta direcciones hacia el Este-noreste y Este-sureste. En esta altura la ocurrencia de vientos en dirección Oeste es muy escasa (menos del 1 %).
- Para las alturas de columnas que se desarrollan entre los 5 y 15 km s.n.m., la dirección principal de los vientos es desde el Oeste hacia el Este (sobre un 55 %), con un mayor desarrollo de estos en dirección Este-sureste, que al Este-noreste. Se detectan vientos con dirección Oeste, en porcentajes muy bajos (menos del 1 %).

En general se observan vientos en todas direcciones, siendo la mayoría en dirección Este y con un bajo desarrollo hacia el Oeste (FIGURA N° 6-1, FIGURA N° 6-2, FIGURA N° 6-3 y FIGURA N° 6-4).

Para las distintas alturas analizadas se observa que la mayor variabilidad en la dirección de los vientos se produce a alturas que sobrepasan los 25 km s.n.m., es decir niveles estratosféricos.

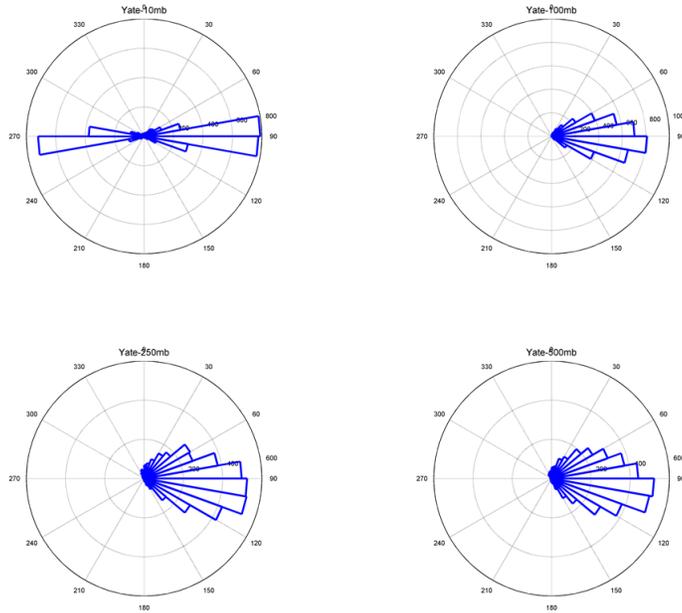
Para observar la variabilidad anual de la dirección de los vientos, se definieron cuatro direcciones principales hacia donde sopla el viento definido entre 0 ° y 360 °.

- Norte: 315 ° a 45 °
- Este: 45 ° a 135 °
- Sur: 135 ° a 225 °
- Oeste: 225 ° a 315 °

Este estudio sólo abarca 4 de los 9 volcanes que han afectado nuestra zona de estudio, según los datos recogidos en el catastro.

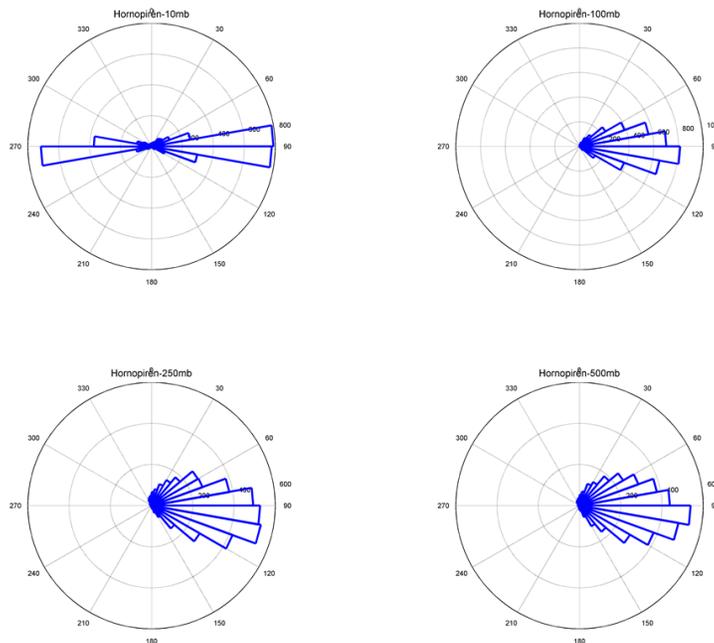
En los estudios de Naranjo y Stern, (2004), Aurum Consultores (2009) y Watt, et al., (2011b)) se muestran mapas de isópacas que indican que la dirección preponderante de los vientos es de oeste a este para todos los centros volcánicos que podrían afectar a nuestra área de estudio (FIGURA N° 6-5, FIGURA N° 6-6, FIGURA N° 6-7).

FIGURA N° 6-1 Patrón de vientos, para el Volcán Yate a 25, 15, 10 y 5 km s.n.m. Rosetas de viento que muestran los vientos que soplan diariamente, indicando la cantidad en la parte central de la roseta, cada barra representa un rango de 10 °



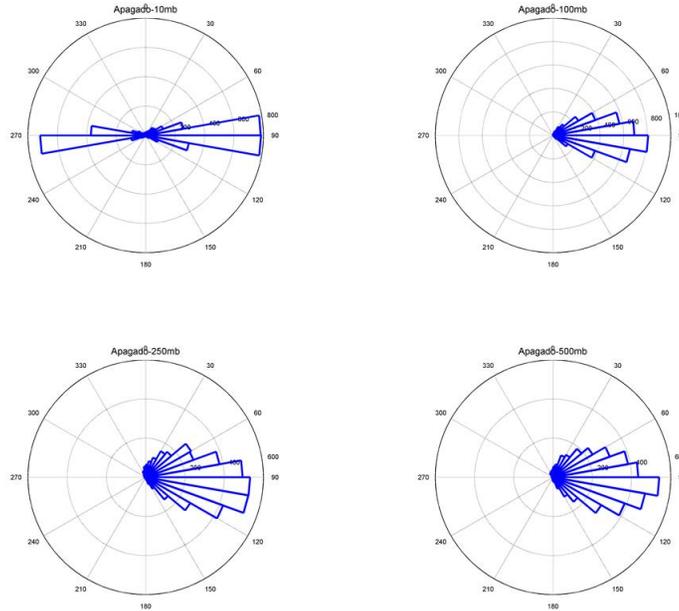
Fuente: Elaboración propia en base a datos de Reanálisis II.

FIGURA N° 6-2 Patrón de vientos, para el Volcán Hornopirén a 25, 15, 10 y 5 km s.n.m. Rosetas de viento que muestran los vientos que soplan diariamente, indicando la cantidad en la parte central de la roseta, cada barra representa un rango de 10 °



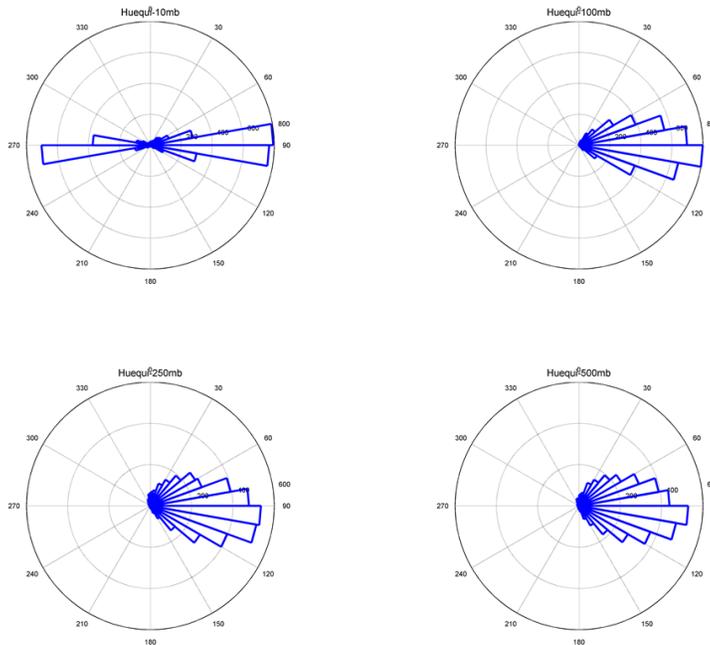
Fuente: Elaboración propia en base a datos de Reanálisis II

FIGURA N° 6-3 Patrón de vientos, para el Volcán Hualaihué a 25, 15, 10 y 5 km s.n.m. Rosetas de viento que muestran los vientos que soplan diariamente, indicando la cantidad en la parte central de la roseta, cada barra representa un rango de 10 °



Fuente: Elaboración propia en base a datos de Reanálisis II

FIGURA N° 6-4 Patrón de vientos, para el Volcán Huequi a 25, 15, 10 y 5 km s.n.m. Rosetas de viento que muestran los vientos que soplan diariamente, indicando la cantidad en la parte central de la roseta, cada barra representa un rango de 10 °



Fuente: Elaboración propia en base a datos de Reanálisis II

FIGURA N° 6-5 En la figura A y B se muestran los mapas Isopacas de 10 cm y las Isopectas de los volcanes Apagado, Hornopirén y Yate.

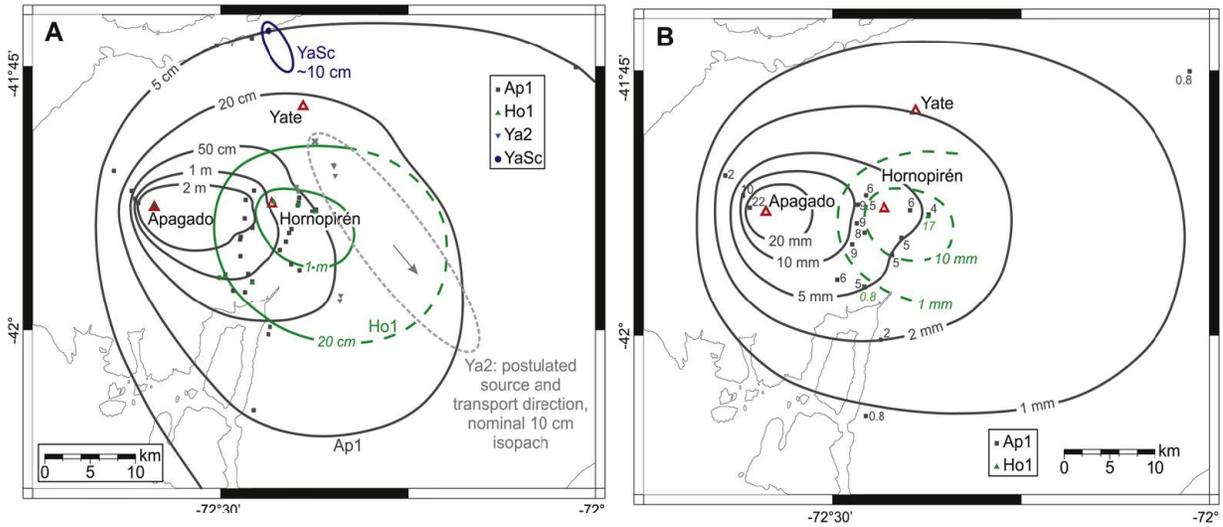


Figura: (Watt, et al., 2011b).

FIGURA N° 6-6 Mapas de Isopacas de 10 cm de los volcanes Calbuco y La Vigueria.

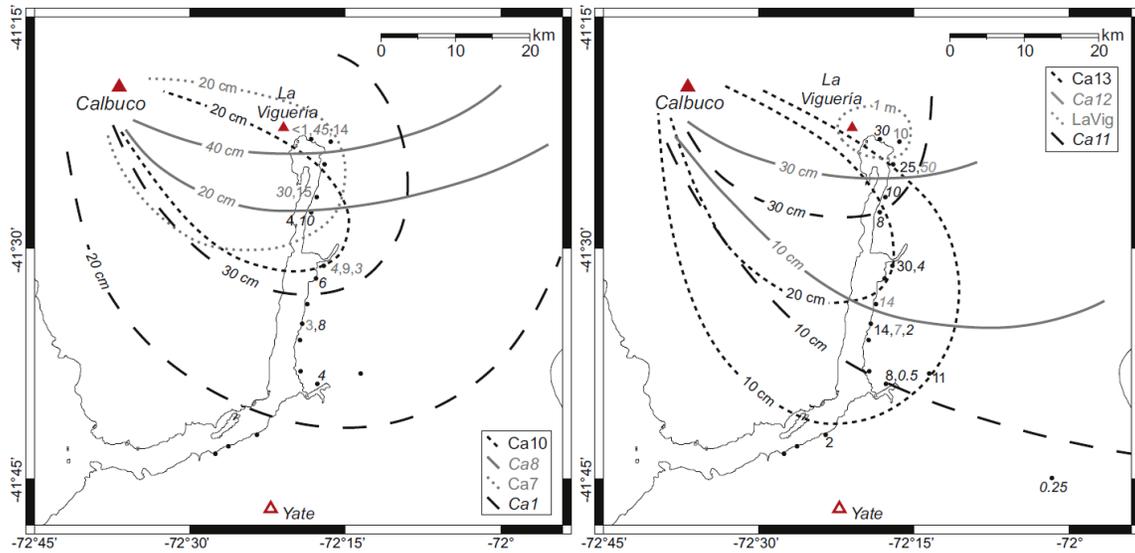
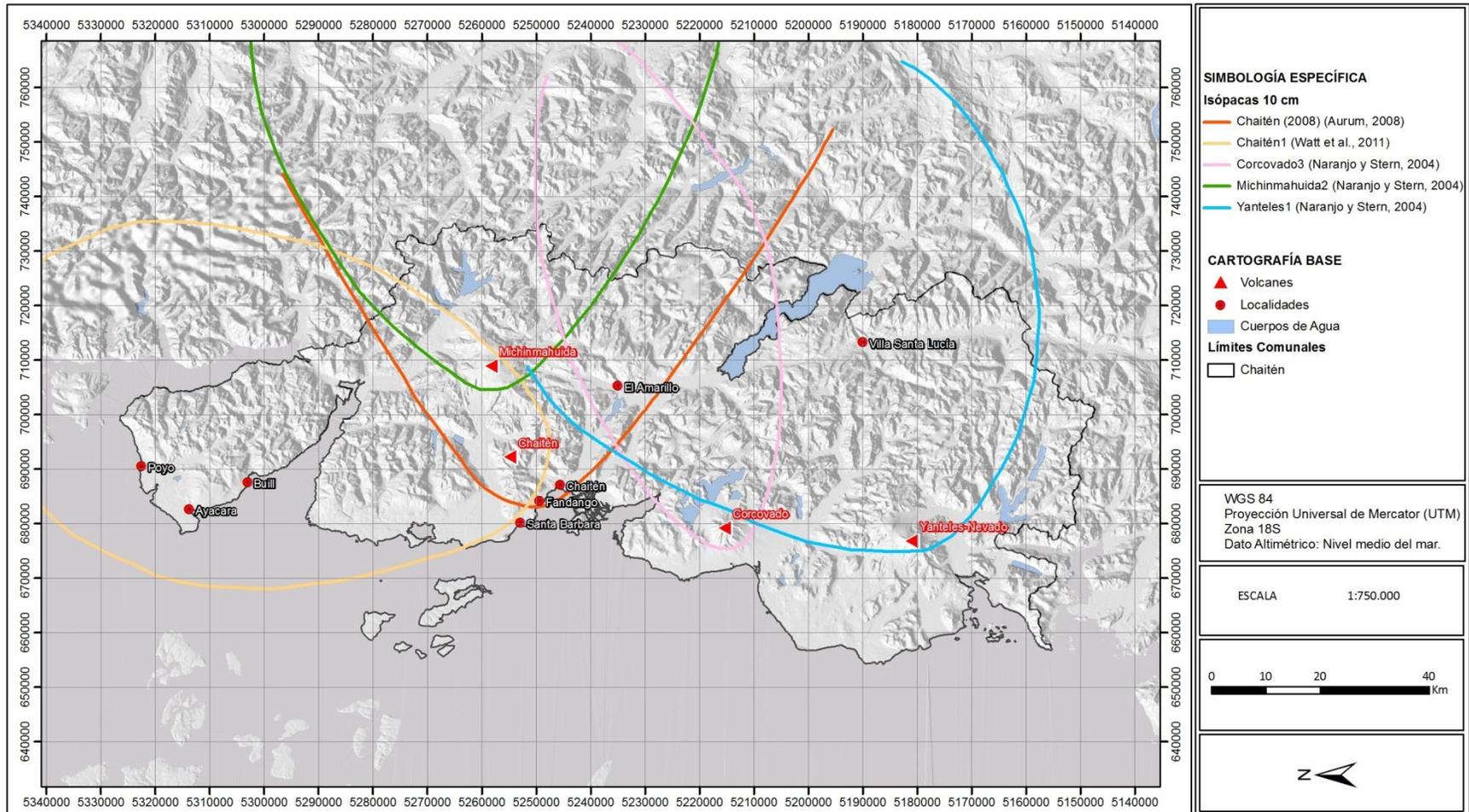


Figura: (Watt, et al., 2011b).

FIGURA Nº 6-7 Mapa de isópacas de 10 cm de los volcanes Michinmahuida, Chaitén, Corcovada y Yanteles-Nevado.



Fuente: Elaboración propia a partir de Naranjo y Stern (2004), Aurum (2009) y Watt et al. (2011b)

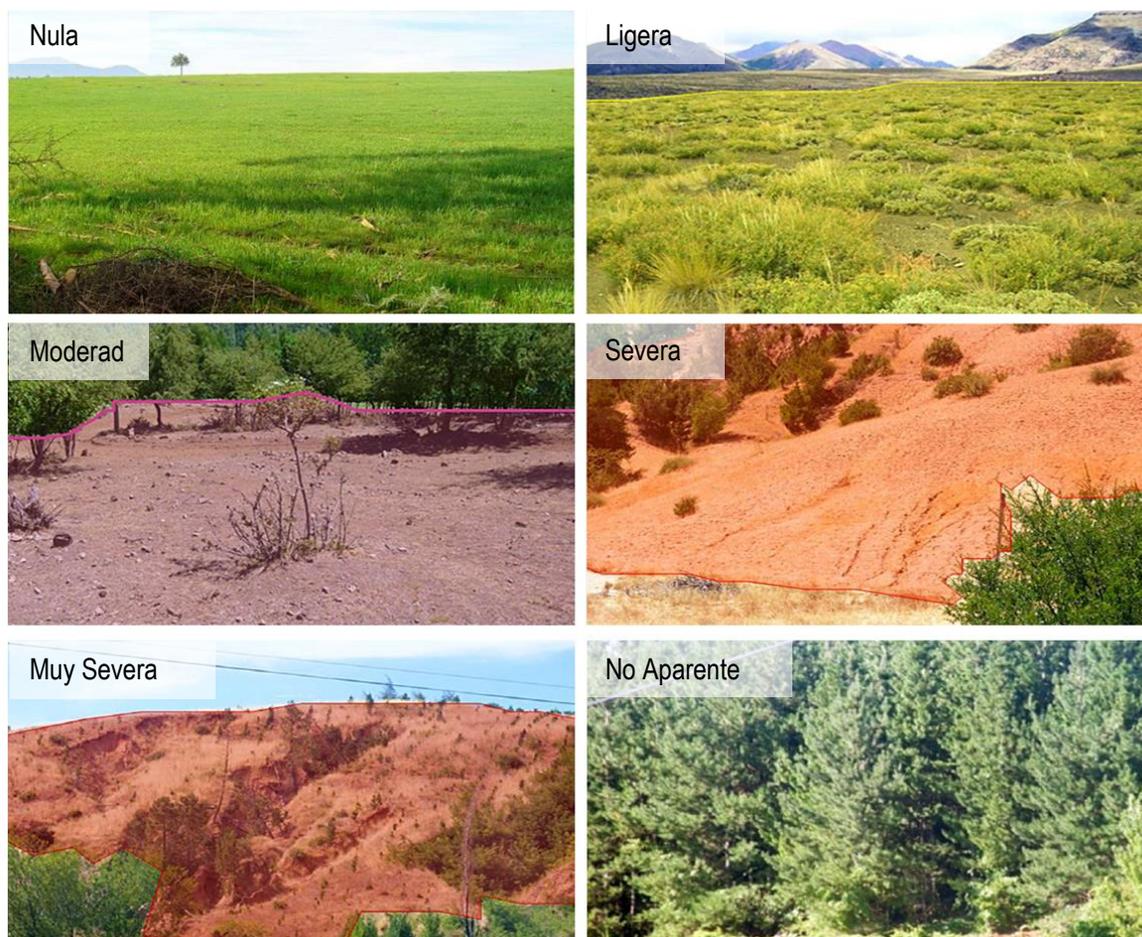
6.1.3 Susceptibilidad Erosión

Existe una superficie actual de suelos erosionados, clasificados en categorías de erosión ligera, moderada, severa y muy severa, de 1,17 millones de hectáreas en la Región de Los Lagos.

Las categorías de erosión se clasifican como (FIGURA N° 6-8):

- **Erosión nula o sin erosión:** la superficie de suelo no presenta alteraciones o signos de pérdidas de suelo o se encuentra protegido de las fuerzas erosivas, como la lluvia, viento o gravedad, por algún tipo de cubierta vegetal, corresponde en términos generales a suelos planiformes o depositacionales.
- **Erosión ligera:** suelo ligeramente inclinado u ondulado o con cobertura de vegetación nativa semidensa (mayor a 50% y menor a 75), que se encuentra levemente alterado el espesor y carácter del horizonte. En la mayor parte de los casos el manejo de estos suelos no es diferente a los suelos no erosionados.
- **Erosión moderada:** suelo que tiene clara presencia del subsuelo en al menos el 30% de la superficie de la unidad en estudio (Unidad cartográfica homogénea, UCH). Existe presencia de pedestales o pavimentos de erosión en al menos el 30% de la superficie. El suelo original se ha perdido entre 40 a 60%. Existe presencia ocasional de surcos o canalículos.
- **Erosión severa:** suelo que presenta ocasionalmente surcos y cárcavas. La unidad presenta entre un 30 a 60% de la superficie con el subsuelo visible, con pedestales o pavimentos. La pérdida de suelo es del orden del 60 a 80%. Hay presencia de zanjas con un distanciamiento medio de 10 a 20 metros.
- **Erosión muy severa:** corresponde a unidades de suelo no apropiadas para cultivos por cuanto se ha destruido el suelo en más de un 60% de la superficie. El subsuelo se presenta a la vista y el material de origen en más de un 60% de la superficie. Existe una presencia de pedestales o pavimento en más del 60% de la superficie. Existe una pérdida del suelo superior al 80% del suelo original. Presencia de cárcavas con distanciamiento medio entre 5 a 10 metros.
- **Erosión no aparente:** corresponde a sectores que se encuentran protegido por algún tipo de cubierta vegetal de densidad mayor a 75% o su uso está sujeto a buenas prácticas de manejo.

FIGURA N° 6-8 Clasificación de erosión de suelos

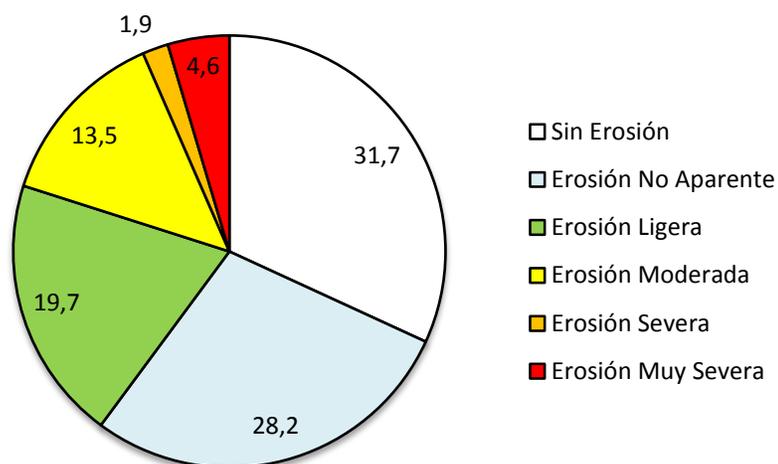


Fuente: Elaboración propia en base al estudio del (CIREN, 2010) .

La comuna de Los Muermos es una de las zonas con mayores índices de erosión de la X Región (CIREN, 2010). Actualmente cuenta con un 39,7 % de superficie erosionada. El dato relevante es el porcentaje correspondiente a la erosión muy severa a moderada que ya representa el 20% de la superficie total de la comuna (FIGURA N° 6-9).

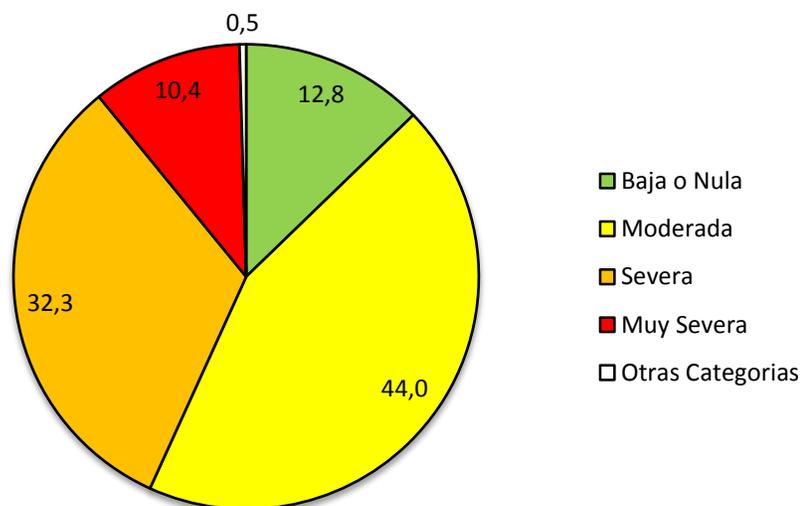
Si bien la superficie actual de la comuna ya tiene un porcentaje bastante elevado de erosión, el índice de riesgo de erosión potencial de la comuna de Los Muermos, que se realizó en el mismo estudio del CIREN (2010), muestra una futura tasa de erosión de los suelos bastante elevada (FIGURA N° 6-10), que hará que en el futuro la erosión Muy elevada a moderada ocupe un porcentaje mayor de la superficie total de la comuna de Los Muermos.

FIGURA N° 6-9 Superficie de erosión actual en la comuna de Los Muermos



Fuente: Elaboración propia en base al estudio del (CIREN, 2010) .

FIGURA N° 6-10 Estadística del índice de riesgo de erosión potencial en la comuna de Los Muermos



Fuente: Elaboración propia en base al estudio del (CIREN, 2010) .

6.2 Peligros Zonificables

6.2.1 *Inundaciones y Flujos de Barro o Detritos*

La bibliografía revisada no muestra datos de este tipo de eventos geológicos específicos de la zona de la comuna de Los Muermos; esto no implica que no haya habido eventos de esta índole en el pasado. El problema radica en que las localidades de estudio son de una baja concentración de población y la probabilidad de encontrar reportes de inundaciones o flujos de barro o detritos es escasa o prácticamente nula. Además, hay que tener en cuenta que se han registrado eventos en lugares aledaños a la zona de estudio.

Las principales inundaciones que podrían afectar a la comuna de Los Muermos tienen relación con desbordes de cauces naturales. Generalmente se manifiestan con una frecuencia anual, en la estación lluviosa, y se han registrado eventos de mayor magnitud asociados a temporales excepcionales.

Las quebradas son zonas muy propicias para generar flujos de barro o detritos debido a la gran cantidad de precipitaciones que se registran en la región (CUADRO N° 6-2), con promedios anuales de precipitaciones superior a los 1.800 mm. Las precipitaciones tienden a aumentar hacia el sur y el oeste. Los montos de las precipitaciones se concentran en invierno, entre los meses de Mayo a Agosto; no obstante durante los restantes meses, estas superan los 60 mm, registrándose ausencia de períodos secos.

CUADRO N° 6-2 Registro pluviométrico mensual promedio de la estación meteorológica de Puerto Montt – El Tepual (41° 25' S, 73° 05' W, 85 msnm)

MESES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	TOTAL
PP (mm)	90,1	93,3	98,8	143,3	243,1	223,8	228,7	208,5	145,9	120,9	111,9	103,1	1802,5

Fuente: Red Hidrométrica de la Dirección General de Aguas. MOP.

La zonificación de susceptibilidad de inundaciones y la de flujos de barro y detritos se detalló para las localidades urbanas de Río Frío-Cañitas (FIGURA N° 6-11) y Los Muermos (FIGURA N° 6-12). A partir del análisis de fotografías aéreas e imágenes satelitales, el mapeo geológico y geomorfológico y la información bibliográfica recopilada, se determinó la siguiente zonificación de susceptibilidad para inundaciones y flujos de barro:

- **Zonas de Muy Alta Susceptibilidad de Anegamiento:** Sectores deprimidos en las áreas de estudio. Geológicamente corresponden a cuerpos de agua y depósitos lacustres.
- **Zonas de Muy Alta Susceptibilidad (Inundación por Desborde de Cauces Naturales y Flujos de barro o detritos):** Sectores de cauces fluviales naturales de ríos, esteros y quebradas. Geológicamente corresponden a depósitos fluviales activos del río Frío en la localidad de Río Frío-Cañitas, del estero El Coipo y de otros esteros menores presentes en la región.
- **Zonas de Alta Susceptibilidad (Flujos de barro o detritos):** Sectores de quebradas. Geológicamente corresponde a depósitos aluviales de quebradas presentes en las dos localidades de estudio.

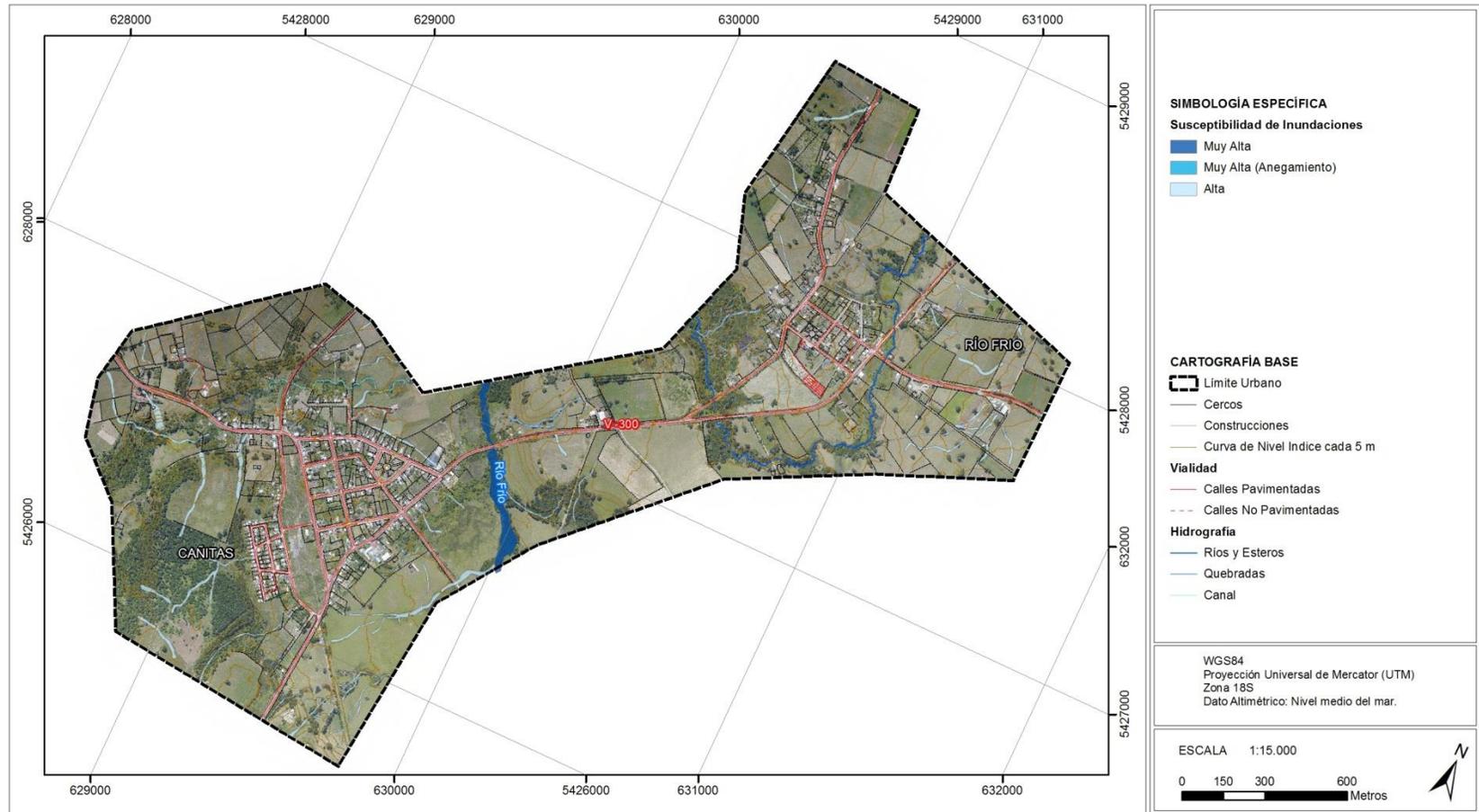
Para las localidades del área de estudio, se puede concluir lo siguiente respecto al peligro de inundaciones y flujos:

- A. Cañitas:** La localidad de Cañitas, se desarrolla limitando por el este con el cauce del río Frío, lo que podría generar que este sector de Cañitas se vea afectado por inundaciones asociadas a desborde de cauce y/o flujos de barro y detritos provenientes de la alta cordillera. En el sector N y S, se presentan zonas cuyas pendientes superan los 15°, por lo que se considera que la zona es susceptible a remociones en masa (FIGURA N° 4-6).
- B. Río Frío:** La localidad de Río Frío, se dispone al norte del cauce del río, lo que podría generar que el sur de Río Frío se vea afectado por inundaciones asociadas a desborde de cauce. En el sector NW de esta localidad se destacan zonas de susceptibilidad a remociones en masa, que en caso de suceder alguna, podría llegar a afectar esta zona de estudio debido a que se presentan zonas cuyas pendientes superan los 15° (FIGURA N° 4-6).
- C. Los Muermos:** El sector más oriental puede resultar más expuesto, debido a que en parte se encuentra construido en las riberas del río. A partir del análisis de fotografías aéreas e imágenes satelitales, así como del Mapa Geológico, se observa el desarrollo de depósitos fluviales activos a lo largo del área urbana propuesta (sector oriente). La presencia de depósitos fluviales activos es indicativo de que es un área altamente susceptible a ser afectada por inundaciones asociadas a desborde de cauce y/o flujos de barro y detritos provenientes de las zonas susceptibles a remociones dispuestas a orillas del río.

En el sector S, E y SE, se presentan zonas cuyas pendientes superan los 15°, por lo que se considera que la zona es susceptible a remociones en masa (FIGURA N° 4-7). En la parte central y más hacia el este se desarrolla un conjunto de quebradas que pueden generar flujos de barro o detritos en toda la zona.

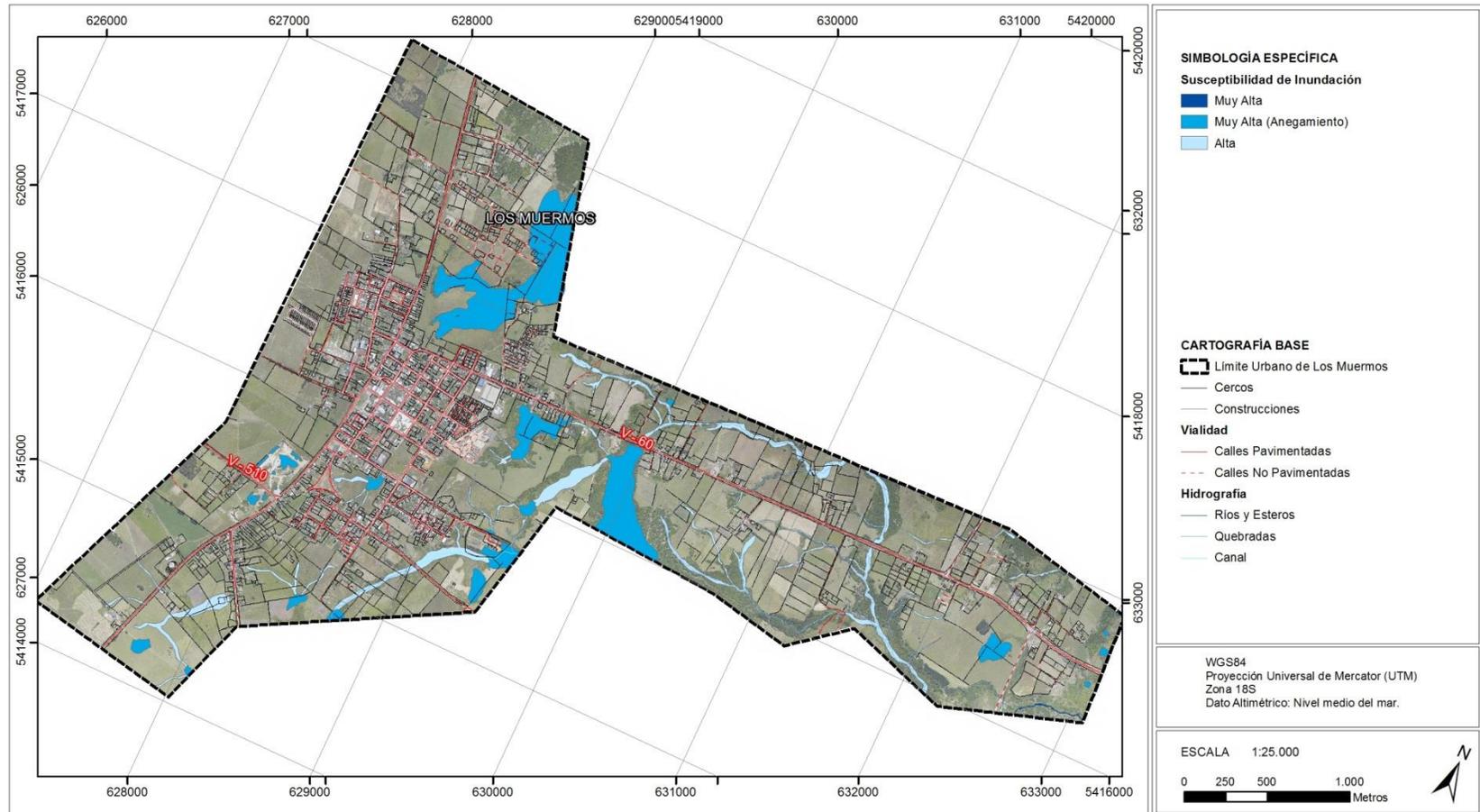
Debido a la gran cantidad de precipitaciones registradas en la zona de estudio (CUADRO N° 6-2) se encuentran muchas zonas susceptibles de sufrir anegamiento. Generalmente se corresponde con zonas deprimidas, suelos de baja permeabilidad y/o zonas donde el nivel freático este muy próximo a la superficie.

FIGURA N° 6-11 Zonificación de susceptibilidad de inundaciones de la localidad de Río Frío–Cañitas



Fuente: elaboración propia

FIGURA N° 6-12 Zonificación de susceptibilidad de inundaciones de la localidad de Los Muermos



Fuente: elaboración propia

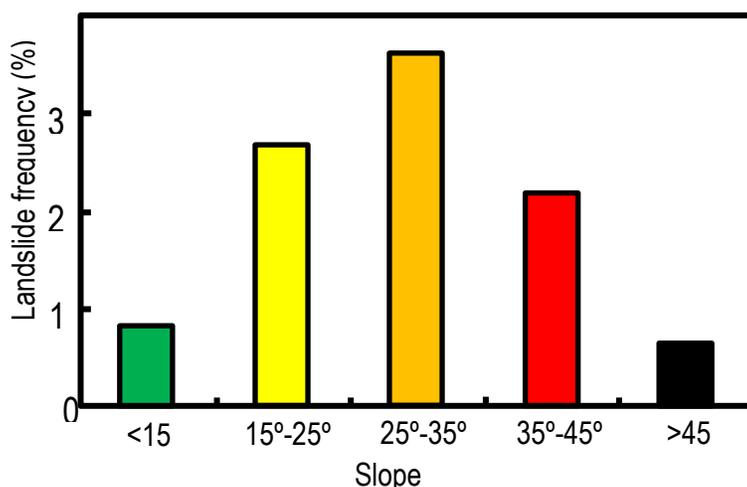
6.2.2 Peligro de Remociones en Masa

En el área de estudio no existen registros históricos de grandes deslizamientos. Sin embargo, en la zona S-SW de Los Muermos y en la zona N – NE y NW - SW, existen condiciones geomorfológicas que pueden favorecer la generación de este tipo de fenómenos.

En el CUADRO N° 6-3 se detalla la influencia de los diferentes factores que condicionan los movimientos de remociones en masa de los peligros asociados a los sectores de Río Frío-Cañitas y Los Muermos.

Para diferenciar que pendientes son las más susceptibles, se utilizó la información compilada a partir de diversas fuentes que han generado catastros de deslizamientos en distintos lugares del mundo. Esaki et al. (2005) y Giraud y Shaw (2007), así como varios catálogos de deslizamientos, indican que la mayor frecuencia de deslizamientos se observa sobre pendientes de 25° a 35° de inclinación (FIGURA N° 6-13).

FIGURA N° 6-13 Frecuencia de deslizamientos en función de la pendiente del terreno



Fuente: Esaki et al. (2005)

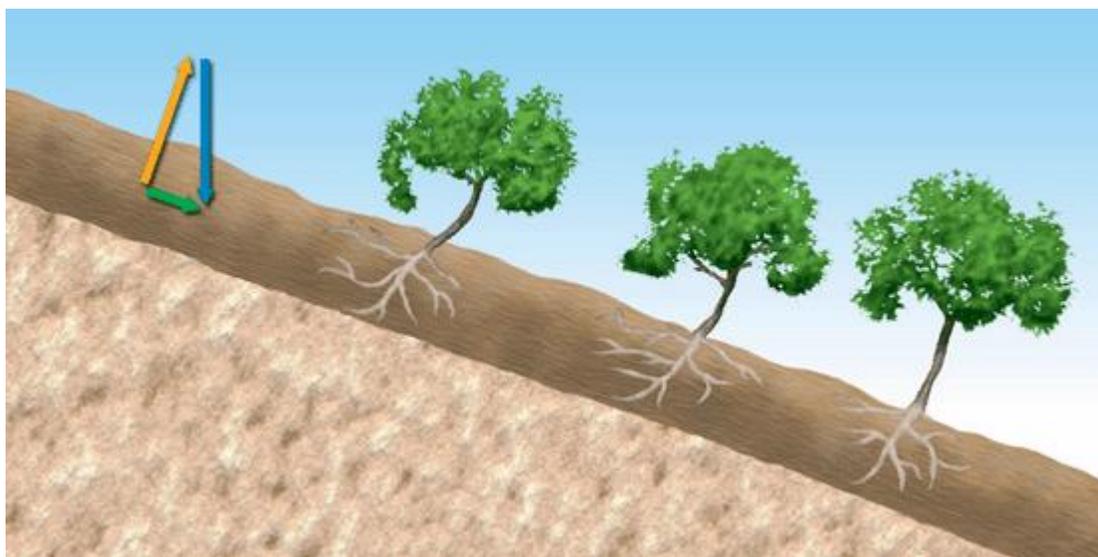
6.2.2.1 Reactivación de movimientos antiguos

Los deslizamientos recientes asociados a grandes terremotos son relativamente fáciles de identificar y analizar, pero los problemas surgen con deslizamientos antiguos cuya geometría y rasgos han sido modificados con el paso del tiempo. Estos deslizamientos pueden reactivarse cuando se producen grandes sismos. Todos los posibles tipos de inestabilidades de laderas pueden darse durante un terremoto, pero las más frecuentes son las caídas de rocas y los deslizamientos.

Considerando lo anterior y los antecedentes recopilados, se zonificó la susceptibilidad de generación de deslizamientos y caída de bloques en base a la carta de pendientes generada a partir del DEM. Se determinaron cuatro categorías (FIGURA N° 6-15 y FIGURA N° 6-16):

- **Muy Alta Susceptibilidad:** Corresponde a sectores de muy alta pendiente (pendientes sobre 35°)
- **Alta Susceptibilidad:** Corresponde a sectores de pendientes entre 25° y 35°
- **Moderada Susceptibilidad:** Corresponde a sectores donde la pendiente se encuentra entre 15° y 25° y las zonas de acumulación de sedimentos provenientes de las laderas con pendientes sobre 15°.
- **Susceptibilidad Moderada (Reptación Lenta):** se corresponden a zonas de pendientes próximas a los 15°, suelos granulares, con empaquetado poco denso, no cohesivo y saturados. También se corresponde a zonas superiores de laderas arcillosas, de en torno a 50 centímetros de espesor o menos y que pueden generar movimiento muy lentos (normalmente imperceptibles) que se dan en capas, conocidos como reptación (FIGURA N° 6-14).

FIGURA N° 6-14 funcionamiento típico de la reptación



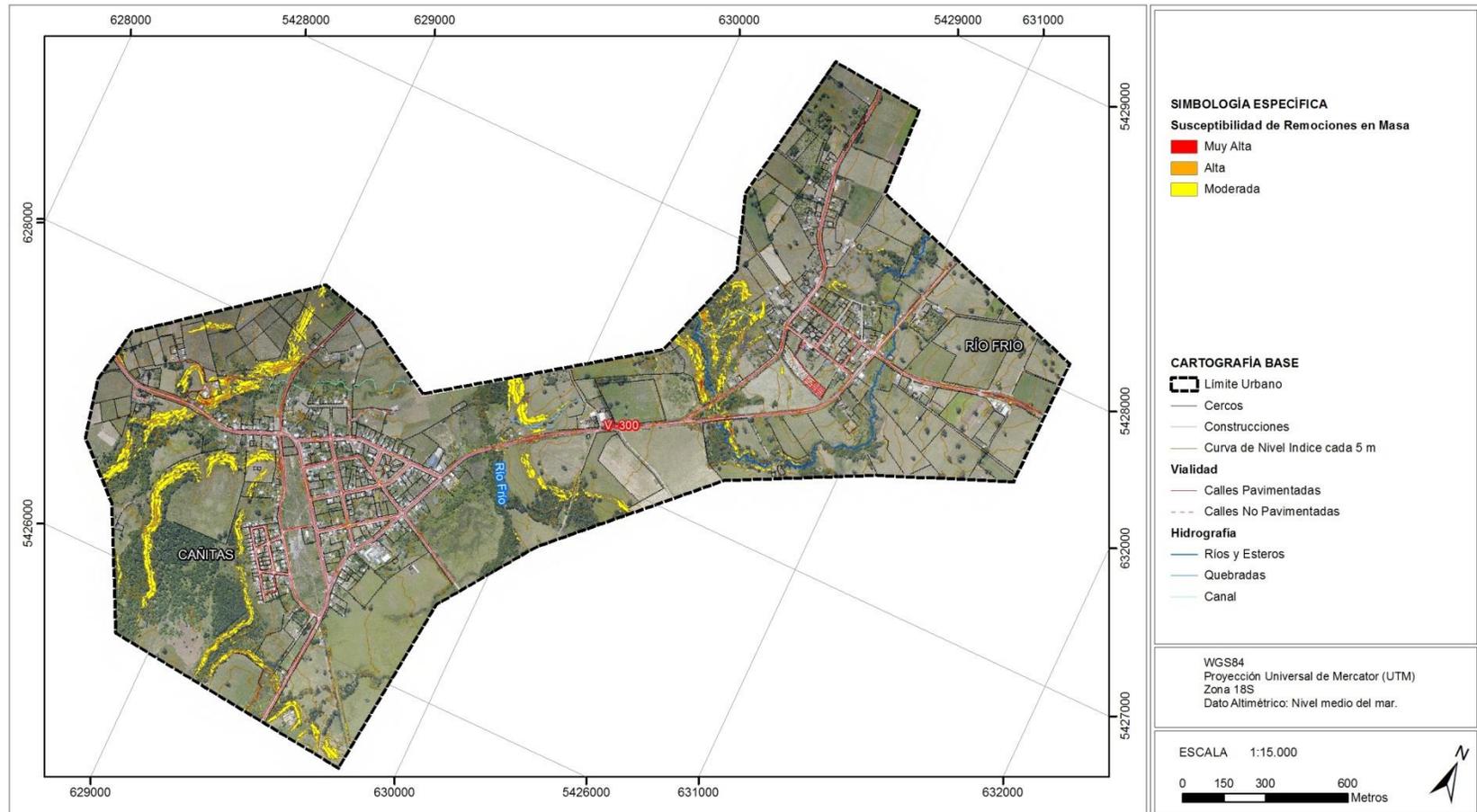
Fuente: <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2008/06/20/95172>

CUADRO N° 6-3 Influencia de los diferentes factores en las condiciones de los materiales y de las laderas

FACTORES		INFLUENCIAS Y EFECTOS
Condicionantes	Relieve (pendientes, geometría)	Distribución del peso del terreno
	Litología (composición, textura)	Densidad, resistencia. Comportamiento hidrogeológico.
	Estructura geológica y estado tensional	Resistencia, deformabilidad. Comportamiento discontinuo y anisótropo. Zonas de debilidad.
	Propiedades geomecánicas de los materiales	Comportamiento hidrogeológico. Generación de presiones intersticiales.
	Deforestación	Modificaciones en el balance hídrico. Erosión.
	Meteorización	Cambios físicos y químicos, erosión externa e interna, generación de zonas de debilidad.
Desencadenantes	Precipitaciones y aportes de agua	Variación de las presiones intersticiales y del peso del terreno. Saturación en suelos. Erosión.
	Cambio en las condiciones hidrológicas	
	Aplicación de cargas estáticas o dinámicas	Cambio en la distribución del peso de los materiales y en el estado tensional de la ladera. Incremento de las presiones intersticiales.
	Cambios morfológicos y de geometría en las laderas	Variación de las fuerzas debido al peso. Cambio en el estado tensional.
	Erosión o socavación del pie	Cambios geométricos en la ladera. Cambios en la distribución del peso de los materiales y en el estado tensional de la ladera.
	Acciones climáticas (procesos de deshielo, heladas, sequías)	Cambio en el contenido de agua del terreno. Generación de grietas y planos de debilidad. Disminución de las propiedades resistentes.

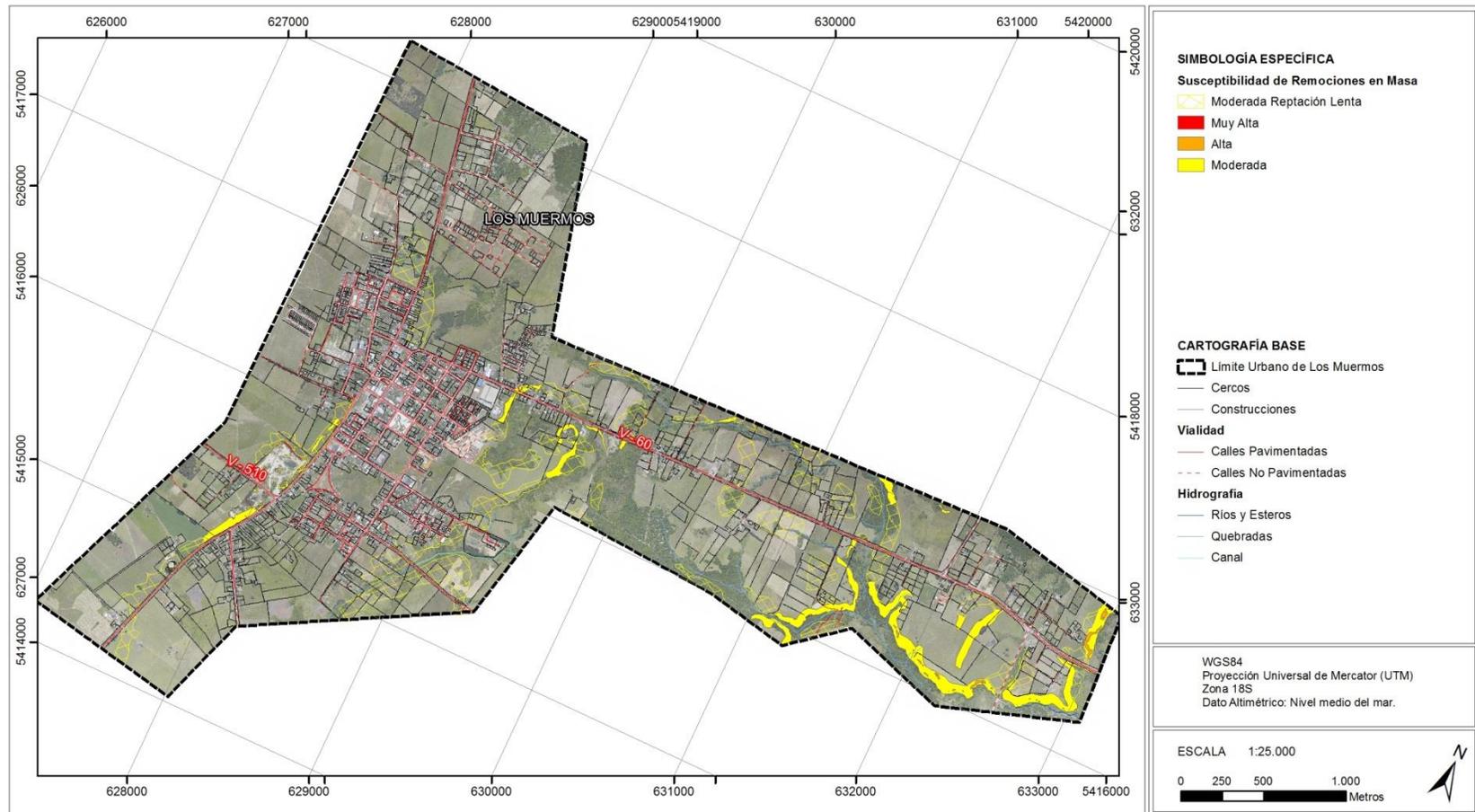
FUENTE: Elaboración propia en base a González, et al., (2002).

FIGURA N° 6-15 Zonificación de susceptibilidad de Remociones en masa de la localidad de Río Frío-Cañitas



Fuente: elaboración propia

FIGURA N° 6-16 Zonificación de susceptibilidad de Remociones en masa de la localidad de Los Muermos



Fuente: elaboración propia

7. SÍNTESIS DE LOS PELIGROS GEOLÓGICOS ANALIZADOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO

En el (CUADRO N° 7-1, CUADRO N° 7-2, CUADRO N° 7-3 y CUADRO N° 7-4) se incluye un resumen de los peligros geológicos analizados en el área de estudio, con una breve descripción, el detalle del inventario de los eventos recopilados o reconocidos y la metodología para la zonificación de susceptibilidad asociada a cada peligro. En el Plano N°3 y Plano N°4 fuera de texto se sintetizan las zonas susceptibles a ser afectadas por los peligros zonificables dentro de las localidades estudiadas.

En la (FIGURA N° 7-1 y FIGURA N° 7-2) se sintetizan las zonas susceptibles a ser afectadas por los peligros zonificables dentro de los límites urbanos de las localidades estudiadas a diversas escalas. Además, en los planos fuera de texto se incluye el mapa síntesis de peligros geológicos a escala 1:5.000 y 1:7.500.

CUADRO N° 7-1 Síntesis de peligro volcánico para el área de estudio, descripción, inventario, metodología y zonificación

Peligro	VOLCANISMO
Descripción	El peligro volcánico, se asocia a los procesos relacionados con la erupción de un volcán. Como se explicó en el Capítulo 4.2 "Marco Geodinámico", el área de estudio se encuentra alrededor de los 41,30°S, zona que se ubica dentro del esquema de segmentación andina de Mpodozis y Ramos (1989), entre los 33° y los 46°S, que corresponde a una zona de subducción tipo chilena que se caracteriza por un ángulo de subducción entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana de aproximadamente 30°. Este segmento se encuentra al sur del segmento ubicado entre los 27° S y los 33°, que se caracteriza por una subducción plana (~10°) y se encuentra aparentemente controlado por la subducción de la dorsal asísmica de Juan Fernández.
Peligros Asociados	Lluvia de Tefra y Proyectiles Balísticos Flujos Piroclásticos Escurrimiento de Lavas Remociones en Masa y Lahares Sismicidad
Factores Desencadenantes	Dinámica de subducción del borde Pacífico del continente Sudamericano
Inventario	El área de estudio se caracteriza por la presencia de actividad volcánica reciente (CUADRO N° 5-1). Los volcanes más próximos al área de estudio corresponden a los volcanes Puntagudo, Cordón de Los Cenizos, Osorno, Calbuco, Hualaihué o Apagado, Yate, Hornopirén, Huequi y Cayutué-La Viguería.
Metodología de Zonificación	El volcanismo no es zonificable a escala local para los alcances de estudio.
Zonas Susceptibles	El peligro volcánico no sería una amenaza directa en la zona ya que no se dispone dentro de la Zona Volcánica Sur (ZVS); pero si uno de los centros volcánicos presentes, entre los 40°S y los 43° S, entrase en erupción se podrían producir efectos adversos tales como: <ul style="list-style-type: none">- Formación de una suspensión de partículas de grano fino en el agua y aire.- Contaminación del agua superficial y muerte de la vida acuática. El recubrimiento químico de la ceniza puede causar un aumento temporal de la acidez del agua que puede durar horas una vez finalizada la erupción.- Puede haber enterramientos y daños estructurales en los edificios al acumularse ceniza en los techos.- Transporte de gases nocivos, ácidos y sales.

Fuente: Elaboración propia

CUADRO N° 7-2 Síntesis de peligro sísmico para el área de estudio, descripción, inventario, metodología y zonificación

Peligro	SISMICIDAD
Descripción	Este peligro está asociado a la zona de subducción de la Placa de Nazca por debajo de la Sudamericana. Los sismos que se analizaron son los de "costa afuera" asociados a extensión por abombamiento, sismos asociados al contacto interplaca, sismos de intraplaca de profundidad intermedia y sismos superficiales por fallas en la placa Sudamericana. Se analizaron los principales eventos sísmicos y los peligros asociados a ellos
Peligros Asociados	Movimientos de terreno
Factores Desencadenantes	Dinámica de subducción del borde Pacífico del continente Sudamericano
Inventario	<p>El área de estudio posee antecedentes históricos de grandes terremotos interplaca tipo thrust, por ejemplo, los terremotos 1575, 1737, 1837 y 1960, tal como se observa en la FIGURA N° 5-4 y Sismos Intraplaca de Profundidad Intermedia y Sismos Corticales.</p> <p>En la bibliografía también se registran sismos en los años 1633 y 1907, que afecta la zona, pero de los cuales se desconocen datos de magnitud (CUADRO N° 5-2).</p> <p>En esta zona, el último gran terremoto fue el de Valdivia de 1960 ($M_w=9.5$), por lo tanto se propone que existe una probabilidad muy baja que se vuelva a producir un terremoto importante (sobre 7.0 -7.5) en dicha zona para un periodo de tiempo próximo (correspondiente al intervalo 2004 y 2024), ver (FIGURA N° 5-8 y FIGURA N° 5-9)</p>
Metodología de Zonificación	La sismicidad no es zonificable a escala local para los alcances de este estudio. En base a antecedentes históricos, mapas de intensidades y comparación con otras zonas, se pueden realizar algunas estimaciones

Peligro	SISMICIDAD
Zonas Susceptibles	<p>El área de estudio ha sido afectada por sismos importantes, al igual que casi todo Chile. Dado que estos fenómenos son recurrentes y propios de la dinámica de subducción en que se encuentra Chile, no debe descartarse la ocurrencia de grandes sismos por subducción en la planificación a mediano y largo plazo.</p> <p>Tanto para los sismos de profundidad intermedia como los sismos corticales, sus características y recurrencias son poco conocidas. Sin embargo, las evidencias recolectadas apuntan a que la zona puede ser afectada por sismos de ambos tipos. Los sismos de profundidad intermedia se registran en todo el país, la mayor parte corresponde a sismos de magnitud pequeña, para la zona los datos sísmicos señalan la ocurrencia de estos sismos, por lo que no se puede descartar un evento de magnitud importante en el futuro.</p>

Fuente: Elaboración propia

CUADRO N° 7-3 Síntesis de peligro de inundaciones para el área de estudio, descripción, inventario, metodología y zonificación

Peligro	INUNDACIONES TERRESTRES Y FLUJOS
Descripción	Este peligro está asociado a eventos pluviométricos extremos, produciendo inundaciones por desborde de cauce o anegamientos. Asociados a estos eventos pueden presentarse flujos de detritos, referidos comúnmente como 'aluviones'
Peligros Asociados	Inundaciones por Desborde de Cauces Inundaciones por Anegamiento Flujos de Detritos
Factores Desencadenantes	Eventos pluviométricos extremos
Inventario	Hasta la fecha no se han encontrado antecedentes que registren inundaciones asociadas al río Frío o al estero El Coipo, que corresponden a los principales cursos de agua de la comuna de Los Muermos. En lo referente a eventos pluviométricos se han registrado los temporales de 1893, 1922, 1934, 1949, 1950, 1958, 1961, 1970, 1979, 1981, 1988, 1990 y 1992 en lugares aledaños a la zona de estudio.
Metodología de Zonificación	Tomando en cuenta los antecedentes históricos y los rasgos geológicos y geomorfológicos reconocidos en el área de estudio, se determinó la siguiente zonificación de susceptibilidad: <i><u>Muy Alta Susceptibilidad:</u> Corresponden depósitos fluviales activos del río Frío en la localidad de Río Frío-Cañitas, del estero El Coipo y de otros esteros menores presentes en la comuna.</i> <i><u>Muy Alta Susceptibilidad (anegamiento):</u> Corresponde a cuerpos de agua y depósitos lacustres.</i> <i><u>Alta Susceptibilidad:</u> Corresponden a los depósitos fluvio-aluviales activos de quebradas cuya área drenada es mayor a 2 km².</i>
Zonas Susceptibles	<i><u>Susceptibilidad Muy Alta:</u> sectores de cauces fluviales naturales de ríos y esteros.</i> <i><u>Susceptibilidad Muy Alta (anegamiento):</u> sectores deprimidos y depósitos lacustres.</i> <i><u>Susceptibilidad Alta:</u> sectores de cauces naturales de quebradas mayores (área drenada mayor a 2 km²).</i>

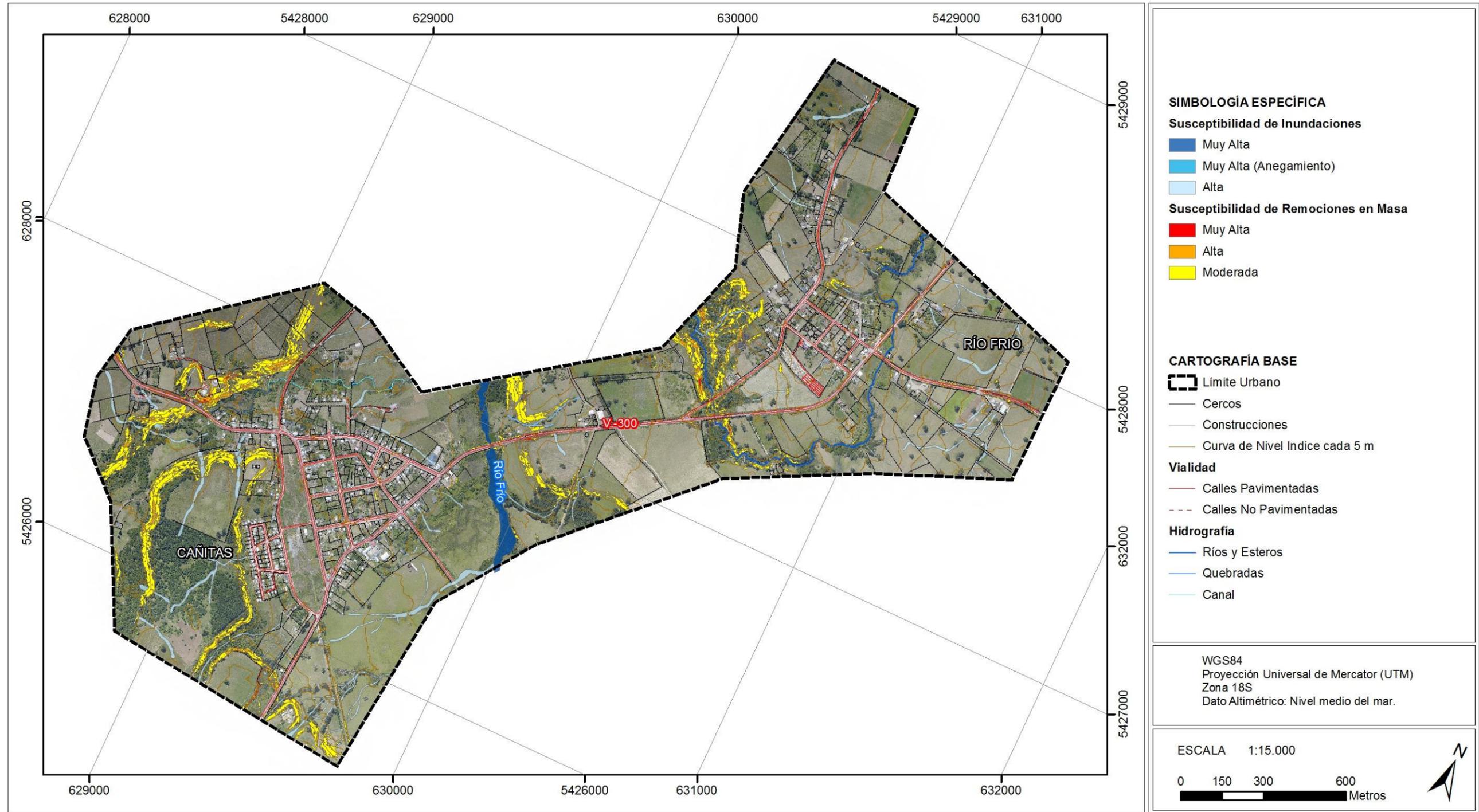
Fuente: Elaboración propia

CUADRO N° 7-4 Síntesis de peligro de remociones en masa para el área de estudio, descripción, inventario, metodología y zonificación

Peligro	REMOCIONES EN MASA
Descripción	Este peligro está asociado a volúmenes de roca o suelo que son transportados por procesos gravitacionales. Se reconocen dos tipos principales, los deslizamientos y las caídas de rocas. Su alcance es en general limitado, y debe ser tratado como un peligro geológico local
Peligros Asociados	Deslizamientos Desprendimientos o Caídas de Rocas
Factores Desencadenantes	Eventos pluviométrico o sísmicos, intervención antrópica
Inventario	<p>La bibliografía revisada no muestra datos de este tipo de eventos geológicos específica de la zona de la comuna de Los Muermos. Pero se ha registrado eventos en lugares aledaños dentro de la provincia de Llanquihue.</p> <p>Particularmente Weischet (1960) describe, que a raíz del sismo del 21 de mayo de 1960, sucedieron pequeños deslizamientos rotacionales en las riberas del río Maullín en las cercanías de Puerto Toledo. Esto a 15 km de la localidad de Los Muermos.</p>
Metodología de Zonificación	<p>Se definieron zonas susceptibles a generar procesos de remoción en masa, principalmente asociadas a las pendientes de las laderas y zonas susceptibles a ser alcanzadas por estos fenómenos (FIGURA N° 6-13), de acuerdo a los siguientes criterios:</p> <ul style="list-style-type: none"> - <u>Susceptibilidad Muy Alta</u>: sectores con pendientes mayores a 35° - <u>Susceptibilidad Alta</u>: sectores con pendientes entre 25° y 35° - <u>Susceptibilidad Moderada</u>: sectores con pendientes entre 15° y 25° y las zonas de acumulación de sedimentos provenientes de las laderas con pendientes sobre 15°. - <u>Susceptibilidad Moderada (Reptación Lenta)</u>: se corresponden a zonas de pendientes próximas a los 15°, suelos granulares, con empaquetado poco denso, no cohesivo y saturados. También se corresponde a zonas superiores de laderas arcillosas, de en torno a 50 centímetros de espesor o menos y que pueden generar movimiento muy lentos (normalmente imperceptibles) que se dan en capas, conocidos como reptación.
Zonas Susceptibles	Los deslizamientos y caídas de rocas están asociados principalmente a laderas poco estables, especialmente en las zonas de altas pendientes

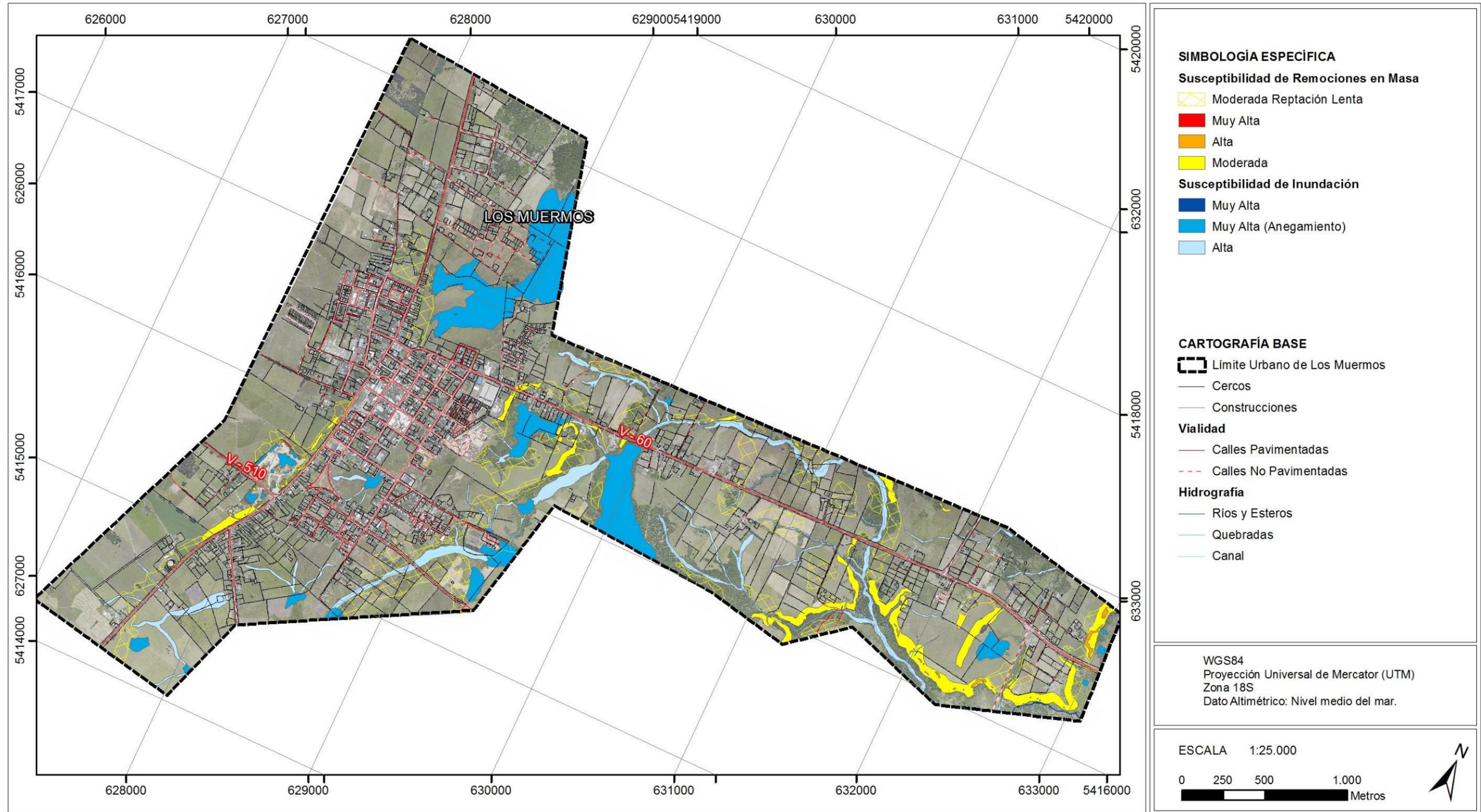
Fuente: Elaboración propia.

FIGURAN°7-1 Mapade síntesis de los peligros geológicos analizados en Río Frío-Cañitas



Fuente: Elaboración propia

FIGURAN 7-2 Mapas de síntesis de los peligros geológicos analizados en Los Muermos



Fuente: Elaboración propia

8. RECOMENDACIONES

En el siguiente CUADRO N° 8-1 se presenta una síntesis de los peligros reconocidos en el área, los criterios según de evaluó la susceptibilidad y la recomendaciones para la zonificación urbana de las áreas susceptibles.

Se recomienda con respecto a los peligros geológicos que se implementen sistemas de alerta temprana y evacuación en caso de eventos meteorológicos que puedan generar inundaciones o remociones en masa (flujos de detritos, deslizamientos y caídas de bloques). Este sistema debe contemplar un plan de emergencia que debe ser comunicado adecuadamente a la comunidad y debe ser periódicamente practicado, bajo la responsabilidad y coordinación de encargados comunales y provinciales de protección civil, con la participación de las comunidades.

Para mitigar los riesgos asociados a remociones en masa e inundaciones, se recomienda controlar el escurrimiento de aguas superficiales, su intercepción, captación, conducción y descarga controlada hacia cauces establecidos. Todo esto con una asesoría técnica-profesional apropiada. Sería importante realizar estudios geotécnicos detallados para zonas de remoción en masa a escala 1:500, analizando los parámetros físicos de las rocas en cada sector susceptible. La escala de trabajo de este estudio es 1:2.500, por lo tanto, se entrega un análisis general del área dentro de las localidades estudiadas que es útil como primer resultado, pero no se considera dentro de los objetivos de este informe una evaluación de detalle como la que sería necesaria.

Se recomienda zonificar como no edificables los sectores ubicados sobre zonas de susceptibilidad muy alta y alta de ser afectadas por deslizamientos y caída de bloques. Para los sectores de susceptibilidad alta de mala respuesta de sitio se sugiere mantenerlos como área verde, mientras que los sectores de susceptibilidad moderada de mala respuesta sitio se recomienda evitar la construcción de equipamiento crítico sin las medidas de mitigación asociadas a este peligro: fundaciones profundas amarradas al basamento, compactación del terreno y evitar construcciones que produzcan mucha carga al terreno, acompañada de estudios geotécnicos adecuados previos al diseño final de la edificación.

Con respecto a las inundaciones, se recomienda realizar estudios hidrológicos detallados para generar una cartografía de las zonas susceptibles a ser afectadas por inundaciones de junto con los períodos de retornos asociados, lo que permite definir zonas de riesgo. Para las áreas susceptibles a estos fenómenos se debe condicionar la utilización a resultados de estudios de detalle, realizados por profesionales especializados en el tema, que determinen el tipo de medidas de mitigación y su adecuado dimensionamiento a los factores locales y tamaño de proyecto. Además, se propone realizar estudios de detalle, que incluyan la instalación de piezómetros para medir cómo se comportan los suelos frente a períodos de precipitación intensos con el objetivo de poder determinar el comportamiento geomecánico del suelo y poder generar alertas tempranas a la población. En terrenos susceptibles de ser afectados por estos peligros se deberá proponer usos sólo con fines recreativos y prohibir la utilización de estas áreas con fines habitacionales.

Finalmente, se recomienda realizar capacitaciones a la población con respecto a los peligros geológicos, considerando sus causas y consecuencias. En caso que la autoridad no pueda dar una alerta oportuna, la educación y conocimiento acerca de los diferentes peligros y riesgos geológicos puede salvar vidas debido ya que condiciona a una reacción correcta y autónoma por parte de la población, tal como quedó demostrado para el reciente terremoto y maremoto ocurrido el 27 Febrero de 2010 cuando en varias localidades los pobladores se alejaron de la costa por cuenta propia después de ocurrido el sismo.

CUADRO N° 8-1 Criterios utilizados para definir la zonificación de susceptibilidad y la zonificación urbana propuesta para cada caso

Peligro	Susceptibilidad	Criterios	Zonificación Urbana
Inundación	Muy Alta	Cauces naturales de ríos y esteros. Geológicamente corresponden a depósitos fluviales activos	Restricción
	Muy Alta (anegamiento)	Áreas de anegamiento. Corresponden a humedales y/o zonas deprimidas	Riesgo (2.1.17) Mitigación con normas urbanísticas
	Alta	Áreas de inundación por desborde de cauces. Geológicamente corresponden a depósitos fluviales de llanuras de inundación y a depósitos fluvio-aluviales de quebradas cuya área drenada es mayor a 2 km ²	Riesgo (2.1.17) Mitigación con normas urbanísticas
Remociones en Masa	Muy Alta	Generación (pendientes >35°), Alcance (probabilidad 1 de alcance en 1m ²)	Restricción en área No Consolidada Riesgo (2.1.17) y mitigación con normas urbanísticas en área Consolidada
	Alta	Generación (pendientes entre 25° y 35°), Alcance (probabilidad entre 0,5 y 1 de alcance en 1m ²)	Restricción en área No Consolidada Riesgo (2.1.17) y mitigación con normas urbanísticas en área Consolidada
	Moderada	Generación (pendientes entre 15° y 25°), Alcance (probabilidad entre 0,1 y 0,5 de alcance en 1m ²)	Mitigación con normas urbanísticas
	Moderada (Reptación Lenta)	Zonas de pendientes próximas a los 15°, suelos granulares, con empaquetado poco denso, no cohesivo y saturados. También se corresponde a zonas superiores de laderas arcillosas, de en torno a 50 centímetros de espesor o menos y que pueden generar movimiento muy lentos (normalmente imperceptibles) que se dan en capas, conocidos como reptación.	Riesgo (2.1.17) y mitigación con normas urbanísticas
	Baja	Alcance (probabilidad menor a 0,1 de alcance en 1m ²)	Normas Urbanísticas

Fuente: Elaboración propia



Andrés Fock Kunstmann
Geólogo, MSc en Ciencias, Mención Geología
RUT: 13.670.870-8

9. REFERENCIAS CITADAS EN EL TEXTO

- Antinao, J., Fernández, J., Naranjo, J. & Villarroel, P., 2002. *Peligro de Remociones en Masa e Inundaciones en la Cuenca de Santiago*, Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile. Serie Geología Ambiental, No. 2, 1 mapa escala 1:100.000.
- Aurum Consultores, 2009. *Estudio de Peligros Volcánicos entre Bahía Pumalín y Chaitén, Décima Región. "Estudio de Factibilidad y Diseño definitivo Terminal Portuario e Infraestructura de pesca Artesanal, Chaitén. Región de Los Lagos"*, s.l.: MOP.
- Börgel, R., 1983. *Geomorfología. Colección Geográfica de Chile..* Santiago: Instituto Geográfico Militar.
- Casertano, L., 1963. *Catlogue of the active volcanoes of the world including solfatar fields. Parte XV*, Roma: International Association of Volcanology.
- Centeno, J., Fraile, M., Otero, M. & Pividal, A., 1994. *Geomorfología Práctica. Ejercicios de fotointerpretación y planificación geoambiental..* Madrid: Ed. Rueda.
- Charrier, R., Pinto, L. & Rodríguez, M., 2007. Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. En: T. Moreno & W. Gibbons, edits. *The Geology of Chile*. Londres: Geological Society of London, pp. 21-114.
- CIREN, 2010. *Determinación de la erosión actual y potencial de los suelos de Chile. Región de Los Lagos.*, s.l.: s.n.
- Comte, D. y otros, 1986. "The 1985 central Chile earthquake: A repeat of previous great earthquakes in the region?". *Science*, Issue 233, pp. 393-500.
- Comte, D. & Pardo, M., 1991. Reappraisal of great historical earthquakes in the northern Chile and southern Peru seismic gaps: *Natural Hazards*, Issue 4, p. 23-44.
- Comte, D. & Pardo, P., 1991. Reappraisal of great historical earthquakes in the northern Chile and southern Peru seismic gaps. *Natural Hazards*, Issue 4, pp. 23-44.
- Corominas, J., Remondo, J. & Farias, P. y o., 1996. *Landslide recognition. Identification, movement and causes..* 1 edition ed. s.l.:Dikau, Brundsen, Schrott e Ibsen Eds. John Wiley & Sons.
- Costa, J., 1984. Physical geomorphology of debris flows. In Developments and Applications of Geomorphology. En: J. E. Costa & P. J. Fleisher, edits. *Developments and Applications of Geomorphology*. Berlin: Springer-Verlag, pp. 268-317.
- Cruden, D. & Varnes, D., 1996. *Landslide types and processes*, Washington D.C.: Special Report 247: Landslides: Investigation and Mitigation, Transportation Research Board.
- Darwin, C., 1938. *On the conexión of certain Volcanic Phenomena in South America; and on the Formation of Mountain Chains and Volcanos, as the effect of the same power by which Continents are elevated..* s.l.:s.n.
- DeMets, C., Gordon, R., Argus, D. & Stein, S., 1994. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophysical Research Letters*, 21(20), pp. 2191-2194.
- Díez-Herrero, A., Laín-Huerta, L. & Llorente-Isidro, M., 2008. *Mapas de Peligrosidad por avenidas e inundaciones: Guía metodológica para su elaboración*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España. Serie Riesgos Geológicos/Geotecnia No. 1, 190 pág.
- Duhart, P., 1999. *Geología del Basamento Metamórfico de la Cordillera de la Costa entre los 41°00'-42°00' L.S., Xª Región, Chile: Consideraciones Geocronológicas*, Concepción: Memoria de Título. Universidad de Concepción.

- Duhart, P. y otros, 2001. El Complejo Metamórfico Bahía Mansa en la Cordillera de la Costa del centro-sur de Chile (39°30'-42°00'S): Geocronología K-Ar, 40 Ar/39Ar y U-Pb e implicancias en la evolución del margen sur-occidental de Gondwana. *Revista Geológica de Chile*, Volumen 28.
- Esaki, T., Thapa, P., Mitani, Y. & Ikemi, H., 2005. *Landslide and debris flow characteristics and hazard mapping in mountain hillslope terrain using GIS, Central Nepal*. Vancouver, En: Eberhardt, E., Hungr, O., Fell, R., Couture, E. (eds), *Proceedings, International Conference on Landslide Risk Managment*, p. 657-669.
- García, F., 1968. El Terciario de Chile, Zona Central. En: C. Giovanni, ed. *Estratigrafía del Terciario de Chile Central*. Santiago: Sociedad Geológica de Chile, pp. 25-57.
- Giardini, D., Basham, P. & Berry, M., 1992. The global seismic hazard assessment program., *Eos Trans. AGU*, 73(48), p. 518.
- Giraud, R. & Shaw, L., 2007. *Landslide Suceptibility Map of Utah*. , s.l.: Utah Geological Survey, 16 p.
- González-Ferrán, O., 1984. *Villarrica Volcano. A high risk active volcanic center. Pacific Volcanology Conference. Forecasting Eruptions*. Hilo, Hawai, s.n., p. Abs. 10.
- González-Ferrán, O., 1995. *Volcanes de Chile*. Santiago: Instituto Geográfico Militar, 410 pág.
- González, L., Ferrer, M., Ortuño, L. & Oteo, C., 2002. *Ingeniería Geológica*. Segunda ed. Madrid: Prentice Hall.
- Hauser, A., 1985. Flujos aluvionales de 1870 y 1896 ocurridos en la ladera norte del volcán Yates, X Región: su implicancia en la evaluación de riesgos naturales. *Revista Geológica de Chile*, Volumen 25-26, pp. 125-133.
- Hauser, A., 1997. *Los aluviones del 18 de Junio de 1991 en Antofagasta: un análisis crítico, a 5 años del desastre*, Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín N° 49, 47 pág.
- Hauser, A., 2000. *Remociones en masa en Chile*. 2da ed. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín N° 59, versión actualizada, 89 pág.
- Infracon S.A-SUBDERE, 2012. *Estudio de riesgos de sismos, volcanismo, remoción en masa, inundación por desborde de cauces y canales y maremotos*., Santiago de Chile, RM.: s.n.
- Kausel, E. & Ramírez, D., 1992. Relaciones entre parámetros focales y macrosísmicos de grandes terremotos chilenos.. *Revista Geofísica*, Volumen 37, pp. 159-194..
- Keeper, D., 1984. Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of América Bulletin*, 95(4), pp. 406-421.
- Keller, E. & Blodgett, R., 2004. *Riesgos Naturales*. Madrid: Pearson Education S.A., 448 pág.
- Lange, 2008. First seismic record for intra-arc strike-slip tectonics along the Liquiñe-Ofqui fault zone at the obliquely convergent plate margin of the southern Andes.. En: *Tectonophysics*. s.l.:s.n., pp. 14-24.
- Lara P., L. & Rauld, R., 2003. *Diagnóstico de la geología ambiental de las grandes ciudades de Chile*. 182 p., il, Santiago: SERNAGEOMIN.
- Lavenu, A., 2005. *Fallas Cuaternarias de Chile*. , Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín No. 62, 71 p. .
- López-Escobar, I., Kilian, R., Kempton, P. & Tagiri, M., 1993. Petrography and geochemistry of Quaternary rocks from the Southern Volcanic Zone of the Andes between 41°30' and 46°00'S, Chile.. *Revista Geológica de Chile*, 20(1), pp. 33-55.
- López-Escobar, L., Tarigi, M. & Vergara, M., 1991. *Geochemical features of Southern Andes Quaternary volcanics between 41°50 and 43°00*, s.l.: S. Geologic Soc. of America. Special Paper 265: 45-56. .

- Martin, G. & Lew, M., 1999. *Recommended Procedures for Implementation of DMG Special Publication 117: Guidelines for Analyzing and Mitigating Liquefaction Hazards in California*. Los Angeles: Southern California Earthquake Center, University of Southern California, 63 pág.
- MOP-CONAF, 1995. *Estudio de Factibilidad, Programa de manejo de Cuencas Hidrográficas, Plan de Ordenamiento y Programa de Manejo Cuenca Río Aconcagua y Estero Marga-Marga.*, s.l.: s.n.
- Mora, C., 2009. *Análisis del enjambre sísmico del fiordo de Aysén durante enero de 2007*, Santiago: Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias, mención Geofísica, Universidad de Chile..
- Mpodozis, C. & Ramos, V. A., 1989. *The Andes of Chile and Argentina In: Ericksen, G. E.; Cañas, M. T.; Reinemund, J. A. (eds) Geology of the Andes and its Relation to Hydrocarbon and Energy Resources. Circum-PACIFIC Council for Energy and Hydrothermal Resources, American Association of Pet.* 11 ed. Houston, Texas: Earth Science Series.
- Myers, B. & Brantley, S., 1995. *Hazardous phenomena at volcanoes*, Vancouver, Washington.: USGS Open File Report, pág. 95-231.
- Myers, B., Brantley, S., Stauffer, P. & II, J. H., 1997. *What are volcano hazards?*, s.l.: US Geological Survey Fact Sheet 002-97, on-line version 1.1, (last modified 2000).
- Naranjo, J. & Stern, C., 2004. Holocene tephrochronology of the southernmost part (42°30'-45°S) of the Andean Southern Volcanic Zone. *Revista Geológica de Chile* 31, 2(31), pp. 225-240.
- Naranjo, J. & Varela, J., 1996. *Debris and mud flows that affected the eastern area of Santiago on May 3, 1993*, Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería. Boletín No. 47, 42 pág.
- Newhall, C. & Self, S., 1982. The volcanic explosivity index (VEI): An estimate of explosive magnitude for historical volcanism.. *Journal of Geophysical Research*, C2(87), pp. 1231-1238.
- Niemeyer, H. & Cereceda, P., 1984. *Geografía de Chile*. Santiago: Instituto Geográfico Militar.
- Nishenko, S., 1985. Seismic potential for large and great interplate earthquakes along the Chilean and Southern Peruvian margins of South America: a quantitative reappraisal. *Journal of geophysical Reserch*, Issue 90, p. 3589-3615.
- Ogura, A. & Soares-Macedo, E., 2000. Procesos y Riesgos Geológicos.. En: *II Curso Internacional de Aspectos Geológicos de Protección Ambiental (UNESCO y UNICAMP)*. Campinas: s.n., pp. 124-147.
- Petit-Breuilh, M., 1995. *EL EFECTO DE LOS DESASTRES NATURALES EN LAS CIUDADES CHILENAS: SIGLOS XI AL XX.* Santiago: Sernageomin.
- Pierson, T. & Scott, K., 1985. Downstream dilution of Lahar: transition from debris flow to hyperconcentrated streamflow. *Water Research*, 21(10), pp. 1511-1524.
- PMA-GCA, 2007. *Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas*. Santiago: Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional, No. 4, 432 p..
- Ramos, V. A. y otros, 1986. Paleozoic Terranes of the Central Argentine-Chilean Andes. *Tectonics*, pp. 855-880.
- Sancho, C., 1997. Los mapas de riesgos. En: J. Peña, ed. *Cartografía geomorfológica básica y aplicada*. Zaragoza: Geomorfa, pp. 181-200.
- Scholz, C., 1990. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. Cambridge: Cambridge University Press, 439 pág.
- Sepúlveda, S., Murphy, W., Jibson, R. & Petley, D., 2005. Seismically-induced Rock Slope Failures Resulting from Topographic Amplification of Strong Ground Motions: The Case of Pacoima Canyon, California.. *Engineering Geology*, Volumen 80, pp. 336-348.
- Sepúlveda, S. y otros, 2010. Landslides induced by the April 2007 Aysén Fjord earthquake, Chilean Patagonia.. *Landslides*, pp. doi: 10.1007/s1034VI-010-0203-2.

- SERNAGEOMIN, 2003. *Mapa Geológico de Chile, Versión Digital*, Santiago: Publicación Geológica Digital, N°4. Santiago, Servicio Nacional de Geología y Minería..
- SERNAGEOMIN, 2003. *Mapa Geológico de Chile, Versión Digital*, Santiago: Publicación Digital. Santiago, Servicio Nacional de Geología y Minería..
- SERNAGEOMIN, 2008. *Levantamiento hidrogeológico y potencial de agua subterránea del valle central de la región de los lagos. Informe final (revisado). Proyecto FNDR código BIP N°.20186775-0.*, s.l.: s.n.
- SERNAGEOMIN-GORE Los Lagos, 2008. *Levantamiento hidrogeológico y potencial de agua subterránea del Valle Central de la Región de Los Lagos. Informe Final (Revisado)*, Puerto Varas: Servicio Nacional de Geología y Minería - Gobierno Regional de los Lagos. 199 pág., 8 mapas escala 1:250.000.
- SERNAGEOMIN-GORE, 2008. *Levantamiento hidrogeológico y potencial de agua subterránea del Valle Central de la Región de Los Lagos. Informe Final (Revisado)*, . Puerto Varas: Servicio Nacional de Geología y Minería - Gobierno Regional de los Lagos..
- Siebert, L. & Simkin, T., 2002. *Volcanoes of the World: An Illustrated Catalog of Holocene Volcanoes and their Eruptions.*, s.l.: Global Volcanism Program Digital Information Series, GVP-3 (<http://www.volcano.si.edu/world/>).
- Söllner, F., Alfaro, G. & Miller, H., 2000. *A carboniferous-permian meta-ignimbrite from Coastal Cordillera West of Puerto Montt, Los Lagos Region, Chile*. Puerto Varas, Congreso Geológico Chileno, pp. 764-769.
- Somoza, R., 1998. Updated Nazca (Farallon)- South America relative motions during the last 40 My: implication for mountain building in the central Andean region.. *Journal of South American Earth Sciences*, Issue 11, pp. 211-215.
- Sruoga, P., 2002. *El volcanismo reciente y riesgo asociado en la Provincia de Mendoza*, Mendoza: IANIGLA, 30 Años de Investigación Básica y Aplicada en Ciencias Ambientales, pág. 255-259.
- Stern, C., 2004. Active Andean Volcanism: Its geologic and tectonic setting. *Revista Geológica de Chile*, Volumen 31, pp. 161-206.
- Susa, D., 2004. *Evaluación del peligro sísmico asociado a sismos de tipo interplaca en Chile y sur del Perú utilizando una distribución bi-paramétrica de Weibull*, Santiago: Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile..
- Tassara, A., Götze, H.-J., Schimdt, S. & Hackney, R., 2006. Three dimensional density model of the Nazca plate and the Andean continental margin. *Journal of Geophysical Research*, 111(B9), p. B09404.
- UNIS/ISDRR, 2004. *Living with Risk: A global review of disaster reduction initiatives*. Génova: (United Nations Inter-Agency Secretariat of the International Strategy for Disaster Risk Reduction, 430 pág.
- Urrutia, R. & Lanza, C., 1993. *Catástrofes en Chile 1541 - 1992*. Santiago: La Noria.
- Varnes, D., 1978. *Slope movement types and processes*, Washington, D.C.: Special report 17VI: Landslides: Analysis and Control, Transportation Research Board.
- Varnes, D., 1984. Hazard Zonation: A Review of Principal and Practice. Commission of Landslide of IAEG, UNESCO. *Natural Hazards*, Volumen 3, pp. 1-61.
- Watt, S., 2010. *Records of volcanism and controls on volcanic processes in southern Chile*. , Oxford: Ph.D. Thesis. Worcester College and the Department of Earth Sciences, University of Oxford..
- Watt, S., Pyle, D. & Mather, T., 2011a. Geology, petrology and geochemistry of the dome complex of Huequi volcano, southern Chile.. *Andean Geology*, 38(2).
- Watt, S. y otros, 2011b. Holocene tephrochronology oh the Hualaihué region (Andean southern volcanic zone, ~42° S), southern Chile. *Quaternary International*, Issue 246 (1-2), pp. 324-343.

Weischet, W., 1960. *Further observations of geologic and geomorphic changes resulting from the catastrophic earthquake of May 1960. Chile, Valdivia: Unpublished Repert. Universidad Austral de Chile. Instituto de Geografía.*

Western Washington University, 2011. *RELIEF GLOBE SLIDES.* [En línea] Available at: <http://www.smate.wvu.edu/teched/geology/GeoHaz/global/globe-17.jpg> [Último acceso: 28 11 2011].