

ESTUDIO FUNDADO DE RIESGOS

PLAN REGULADOR COMUNAL DE SIERRA GORDA

El profesional que suscribe el presente Estudio Fundado de Riesgos del Estudio Modificación
Plan Regulador Comunal de Sierra Gorda



RODRIGO RAULD PLOTT
GEOLOGO, DOCTOR EN CIENCIAS

ESTUDIO FUNDADO DE RIESGOS

**INFORME 3 PROYECTO E INFORME AMBIENTAL
PLAN REGULADOR COMUNAL DE SIERRA GORDA**

“Áreas de Riesgo Plan Regulador Comunal de Sierra Gorda”

El presente documento corresponde al estudio “ZONIFICACIÓN DE PELIGROS GEOLÓGICOS” encargado por la Secretaría Regional Ministerial de Vivienda y Urbanismo Región de Antofagasta a Habiterra Ltda.

EQUIPO CONSULTOR:

Rodrigo Rauld Plott, Geólogo, Doctor en Ciencias
Andrés Fock Kunstmann, Geólogo, MSc en Ciencias, Mención Geología
Felipe García-Huidobro, MSc en Ciencias, Mención Geología
Constanza Urresty Vargas, Geóloga
Vicente Letelier Carvajal, Geólogo
Katherine Pinochet Oviedo, Geóloga

PROFESIONAL RESPONSABLE

Rodrigo Rauld Plott

CONTRAPARTE TÉCNICA:

Ilustre Municipalidad de Sierra Gorda
SEREMI de Vivienda y Urbanismo, Región de Antofagasta

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Ubicación Área de Estudio	1
1.2	Objetivo.....	1
1.3	Alcance y limitaciones.....	4
1.4	Marco Jurídico	4
2	METODOLOGÍA	6
2.1	Definición del Área de Estudio.....	7
2.2	Elaboración de la línea de base geológica y geomorfológica	7
2.2.1	Recopilación Bibliográfica	7
2.2.2	Interpretación de fotografías aéreas e imágenes satelitales	8
2.2.3	Morfometría.....	8
2.2.4	Elaboración mapa geológico y geomorfológico.....	9
2.3	Visita técnica al área de estudio	9
2.4	Inventario de Peligros Geológicos	11
2.5	Catastro de Factores Condicionantes.....	12
2.6	Diagnóstico de Susceptibilidad	12
3	LÍNEA DE BASE	13
3.1	Marco Geodinámico.....	13
3.2	Marco Geomorfológico.....	14
3.2.1	Unidades morfoestructurales.....	14
3.2.2	Morfometría.....	16
3.3	Marco Geológico.....	20
3.3.1	Marco Geológico Regional.....	20
3.3.2	Marco Geológico de la localidad de Sierra Gorda (basado en SERNAGEOMIN (2003)).....	20
3.3.3	Marco Geológico de la localidad de Baquedano (basado en Basso (2004)).....	23
3.3.4	Estructuras.....	27
3.4	Marco Climático	29
3.5	Marco Hidrológico	32
4	INVENTARIO DE PELIGROS GEOLÓGICOS	34
4.1	Sismos	34
4.1.1	Antecedentes Históricos	34
4.1.2	Sismos registrados por la red sismológica mundial	36
4.1.3	Principales fuentes sísmicas reconocidas en el área de estudio	38

4.2	Centros volcánicos y evidencias de actividad volcánica	39
4.3	Procesos de remoción en masa.....	41
4.4	Inundaciones terrestres (desbordes de cauces y anegamientos)	44
5	DIAGNÓSTICO Y ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD A LOS PELIGROS GEOLÓGICOS QUE PUEDEN AFECTAR EL ÁREA DE ESTUDIO.....	45
5.1	Peligros No Zonificables	45
5.1.1	Peligro Sísmico	45
5.1.2	Peligro Volcánico	45
5.2	Peligros Zonificables.....	46
5.2.1	Peligro de Inundaciones, Anegamientos y Flujos de Detritos y/o Barro.....	46
5.2.2	Peligro de Remociones en Masa	52
6	RECOMENDACIÓN DE CRITERIOS PARA LA ZONIFICACIÓN	55
6.1	Recomendaciones para la Zonificación Urbana.....	55
6.2	Otras recomendaciones.....	55
7	Riesgo antrópico.....	58
7.1	Planta Hasser.	58
7.2	Mina Sierra.....	61
7.3	Diagnóstico de la calidad del aire por material particulado respirable.....	62
7.3.1	Material Particulado Respirable MP10.....	63
7.3.2	Material Particulado Respirable MP2.5.....	64
7.3.3	Evaluación de la Calidad del Aire	65
8	REFERENCIAS	66

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA N° 1-1	Ubicación de la comuna de Sierra Gorda.....	2
FIGURA N° 1-2	Ubicación de las áreas de estudio de detalle que comprenden las localidades de Sierra Gorda y de Baquedano	3
FIGURA N° 2-1	Diagrama de flujo del trabajo realizado	6
FIGURA N° 2-2	Recorrido realizado durante la visita a terreno a los sectores de interés de este informe el día 15 de diciembre del 2014	10
FIGURA N° 3-1	Marco geodinámico representado en3D.....	13
FIGURA N° 3-2	Unidades morfoestructurales a nivel regional.....	15
FIGURA N° 3-3	Carta de elevaciones de la comuna de Sierra Gorda	17
FIGURA N° 3-4	Carta de pendientes de la comuna de Sierra Gorda	18
FIGURA N° 3-5	Carta de exposición de laderas de la comuna de Sierra Gorda	19
FIGURA N° 3-6	Depósitos no consolidados asociados a las Gravas de Atacama.....	21
FIGURA N° 3-7	Grietas de desecación en depósitos aluviales y coluviales recientes.	22
FIGURA N° 3-8	Depósitos finos sobre los cuales se asienta la localidad de Sierra Gorda.....	23

FIGURA N° 3-9 Mapa Geológico 1:100.000 de la localidad de Sierra Gorda. Se marcan los abanicos aluviales coalescentes próximos a la localidad.....	24
FIGURA N° 3-10 Depósitos aluviales y coluviales antiguos.....	25
FIGURA N° 3-11 Mapa geológico 1:100.000 de la localidad de Baquedano y sus alrededores.	26
FIGURA N° 3-12 Fallas activas e inactivas que se encuentran cercanas a la comuna de Sierra Gorda	28
FIGURA N° 3-13 Tipos de climas de la Región de Antofagasta y de la comuna de Sierra Gorda	30
FIGURA N° 3-14 Isoyetas y evapotranspiración potencial de la Región de Antofagasta	31
FIGURA N° 3-15 Temperaturas y precipitaciones medias mensuales para las localidades de Sierra Gorda y Baquedano.....	32
FIGURA N° 3-16 Principales cuencas de la comuna de Sierra Gorda.....	33
FIGURA N° 4-1 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	36
FIGURA N° 4-2 Mapa regional con la sismicidad registrada instrumentalmente	37
FIGURA N° 4-3 Ubicación de los centros volcánicos próximos a la comuna de Sierra Gorda.....	40
FIGURA N° 4-4 Un torrente de barro cortando la Ruta 25 de la comuna de Sierra Gorda	41
FIGURA N° 5-1 Acumulación de sedimentos finos y desarrollo de grietas de desecación producto del anegamiento en bajos topográficos, Sierra Gorda.....	46
FIGURA N° 5-2 Zonificación de abanicos aluviales aportantes en el área de detalle de Sierra Gorda.....	49
FIGURA N° 5-3 Evidencias geomorfológicas de la ocurrencia de flujos históricos. Con flechas negras se indican las direcciones de flujo (E-W aprox).	50
FIGURA N° 5-4 Zonificación de abanicos aluviales aportantes y la quebrada principal, en el área de detalle de Baquedano	51
FIGURA N° 5-5 Frecuencia de deslizamientos en función de la pendiente del terreno	52
FIGURA N° 5-6 Carta de pendientes del área de estudio de detalle de la localidad de Sierra Gorda.....	53
FIGURA N° 5-7 Carta de pendientes del área de estudio de detalle de la localidad de Baquedano. 54	

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO N° 1-1 Cuadro de homologación “áreas de riesgo” según el artículo 2.1.17 del OGUC	5
CUADRO N° 3-1 Estadígrafos de la carta de elevaciones.....	16
CUADRO N° 3-2 Estadígrafos de la carta de pendientes.	16
CUADRO N° 3-3 Tabla resumen de las temperaturas y precipitaciones medias de las localidades de Sierra Gorda y Baquedano, con los respectivos años de medición y fuente	32
CUADRO N° 4-1 Registro histórico de los más grandes sismos interplaca ocurridos en la zona de estudio	35
CUADRO N° 4-2 Catastro de remociones en masa recopilado a partir de referencias bibliográficas	42
CUADRO N° 4-3 Catastro de temporales que han afectado a la comuna de Sierra Gorda.....	44
CUADRO N° 6-1 Recomendación de criterios para la zonificación en áreas de riesgo	57

ÍNDICE DE PLANOS FUERA DE TEXTO

Plano N°1: Mapa de Susceptibilidad a Inundaciones y Anegamientos en el área de detalle de la localidad de Sierra Gorda

Plano N°2: Mapa de Susceptibilidad a Inundaciones y Anegamientos en el área de detalle de la localidad de Baquedano

1 INTRODUCCIÓN

El presente documento corresponde a la segunda etapa del estudio de riesgos geológicos de las localidades de la comuna de Sierra Gorda solicitadas, el que se enmarca dentro de la “Actualización Plan Regulador Comunal de Sierra Gorda”. Este estudio ha sido solicitado por la Secretaría Regional Ministerial de Vivienda y Urbanismo, Región de Antofagasta y tiene como objetivo reunir información acerca de los peligros geológicos que afectan a la comuna para la toma de decisiones con respecto al uso del territorio.

1.1 Ubicación Área de Estudio

La comuna de Sierra Gorda se ubica en el centro de la II Región de Antofagasta, en la Provincia de Antofagasta. Geográficamente, se sitúa a 95 km al norte de la capital regional, a 1.035 metros sobre el nivel del mar. La comuna se extiende entre los 22° 34' y 23° 54' de latitud Sur y desde 68° 35' de longitud Oeste hasta 70° 02' de longitud Oeste. Limita al oeste con la comuna de Mejillones, al norte con María Elena y Calama, al este con San Pedro de Atacama y al sur con la comuna de Antofagasta (FIGURA N° 1-1).

El principal acceso terrestre a la comuna corresponde a la Ruta 25 por el norte y a la Ruta 5 por el sur, las cuales conectan las comunas de Calama y Antofagasta. A través de la Ruta 5, se accede a la localidad de Baquedano; continuando hacia el norte por la Ruta 25, se tiene acceso a la localidad de Sierra Gorda (FIGURA N° 1-1).

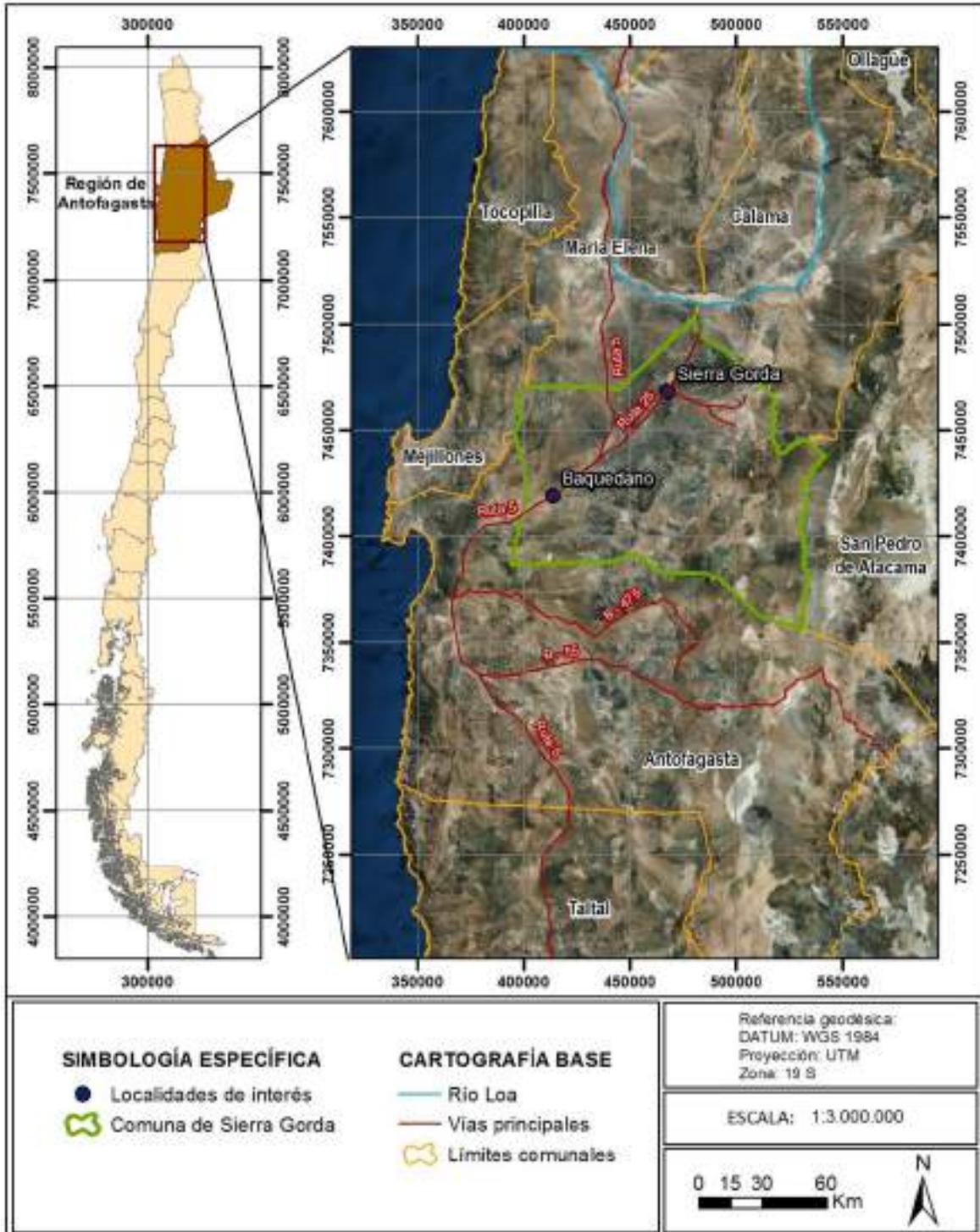
Este trabajo se enfoca en dos áreas de estudio de detalle de la comuna de Sierra Gorda que comprenden las localidades de Baquedano y de Sierra Gorda (FIGURA N° 1-2).

1.2 Objetivo

El objetivo principal de este trabajo es generar el Estudio Fundado de Riesgos Geológicos que acompañe y entregue criterios para la actualización del Plan Regulador Comunal de Sierra Gorda. Asociado al objetivo propuesto es necesario reconocer y delimitar las áreas de riesgos, de acuerdo a los criterios y definiciones expuestos en el artículo 2.1.17 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, que han de ser incorporadas y/o adecuadas en el Plan Regulador Comunal de Sierra Gorda.

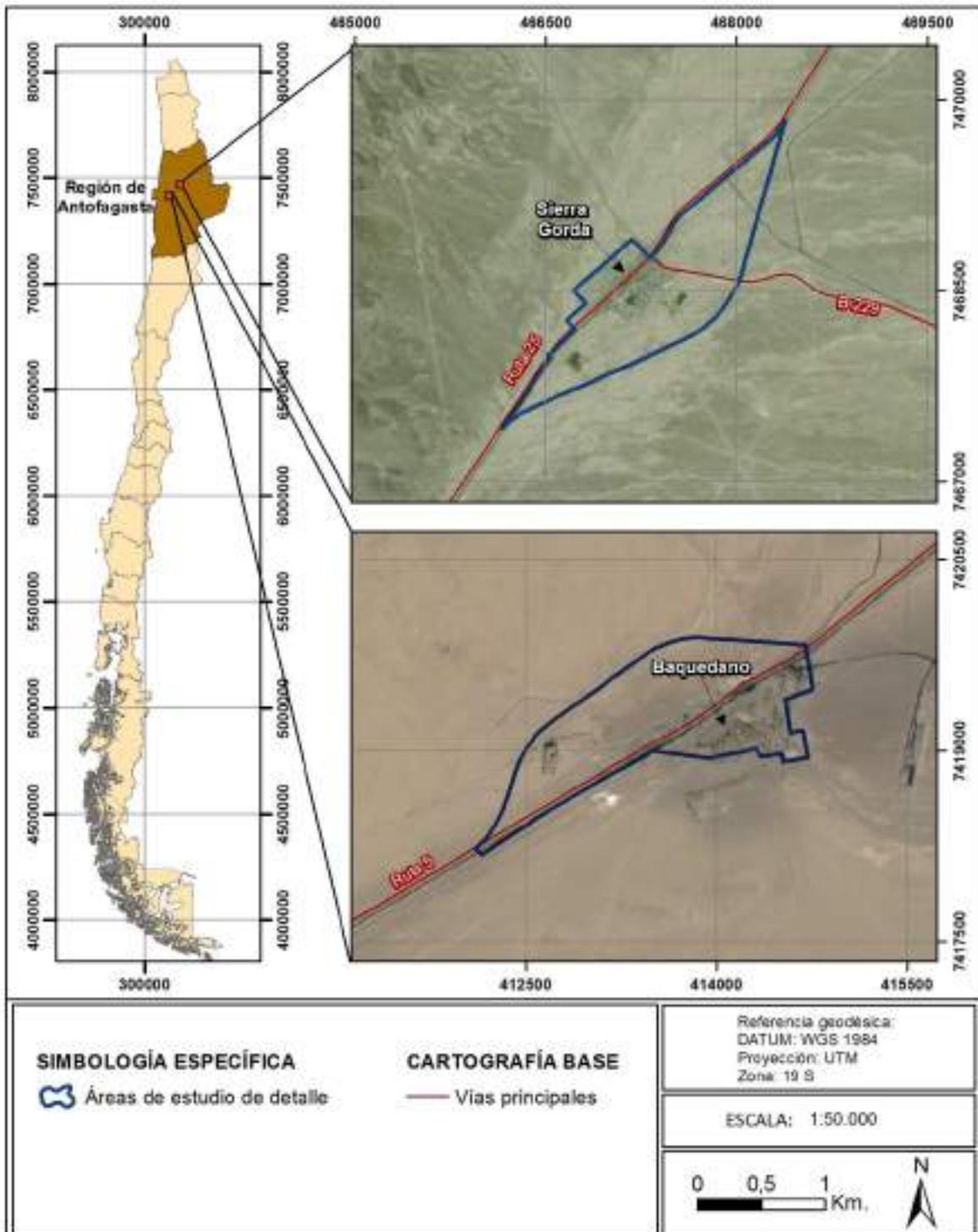
El objetivo específico de esta etapa del proyecto consiste en la elaboración de una línea base geológica y geomorfológica regional, además de un inventario, descripción y diagnóstico de los principales peligros geológicos que pueden afectar al área y una zonificación de susceptibilidad para los peligros geológicos identificados en las áreas de detalle de este estudio.

FIGURA Nº 1-1 Ubicación de la comuna de Sierra Gorda



Fuente: Elaboración propia

FIGURA N° 1-2 Ubicación de las áreas de estudio de detalle que comprenden las localidades de Sierra Gorda y de Baquedano



Fuente: Elaboración propia

1.3 Alcance y limitaciones.

Para esta etapa del trabajo se realizó una compilación de referencias bibliográficas, antecedentes históricos, revisión de imágenes satelitales, visita a terreno y la evaluación de los distintos factores condicionantes para realizar la zonificación de peligros geológicos en los dos sectores de interés que incluyen a las localidades de Sierra Gorda y de Baquedano. La zonificación se realizó, a una escala 1:5.000 y a 1:50.000 (para inundaciones) y a 1:10.000 (para remociones en masa), considerando que la gran mayoría de la información geológica está a una escala menor a 1:100.000. 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 llevó a cabo ningún análisis riguroso de períodos de retorno (peligrosidad o amenaza) o de consideraciones socio-económicas (vulnerabilidad) de acuerdo a estándares internacionales, 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 de los diferentes peligros geológicos identificados. A partir del análisis de estos, se generaron mapas de susceptibilidad a inundaciones y anegamientos a escala 1:5.000 (en planos fuera de texto) y 1:50.000 en las dos áreas de estudio de detalle y un mapa de susceptibilidad a remociones en masa a escala 1:10.000 en el área de estudio que comprende la localidad de Baquedano.

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, dado que la zonificación se realizó a partir de mapas de susceptibilidad y de factores condicionantes.

En el CUADRO N° 1-1 se presentan los peligros naturales identificados por el artículo 2.1.17 de la OGUC y la homologación con la nomenclatura internacional utilizada por este informe¹. A continuación, se desglosa donde se presenta la definición de estos peligros geológicos y los criterios de zonificación utilizados.

- Apartado 1 del artículo 2.1.17 de la OGUC: 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, el Apartado 1 del artículo 2.1.17 de la OGUC corresponde a los peligros geológicos de inundación, ya sea continental o costera. Este tópico que se explica conceptualmente en el Anexo A.3.1 “Inundaciones Terrestres y Litorales”.

- Apartado 2 del artículo 2.1.17 de la OGUC: Zonas propensas a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas.

El Apartado 2 del artículo 2.1.17 de la OGUC 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 Anexo B.2.2 “Procesos de Remoción en Masa”.

- Apartado 3 del artículo 2.1.17 de la OGUC: 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 el Anexo A.2.1 “Sismicidad” y Anexo A.2.2 “Volcanismo”.

CUADRO N° 1-1 Cuadro de homologación “áreas de riesgo” según el artículo 2.1.17 del OGUC

“Áreas de riesgo” según artículo 2.1.17 de la OGUC	Peligros estudiados en este informe	
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.	Inundación por desborde de cauces	
	Anegamiento	
2. Zonas propensas a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas.	Remociones en masa	Flujo de barro y detritos.
		Caída de bloques
		Deslizamientos
		Retroceso de laderas
3. Zonas con peligro de ser afectadas por actividad volcánica, ríos de lava o fallas geológicas.	Sismicidad	
	Volcanismo	Flujos de piroclastos
		Caída de piroclastos
		Coladas de lava
4. Zonas o terrenos con riesgos generados por la actividad humana.	Pasivos ambientales mineros.	

Fuente: Elaboración propia en base a la normativa 2.1.17.

¹ La nomenclatura utilizada en este informe se basa en las definiciones propuesta por la ONU, UNESCO y SERNAGEOMIN, entre otros (ver Varnes (1984), ONU/EIRD (2004), PMA-GAC (2007) JTC-1 (2008)).

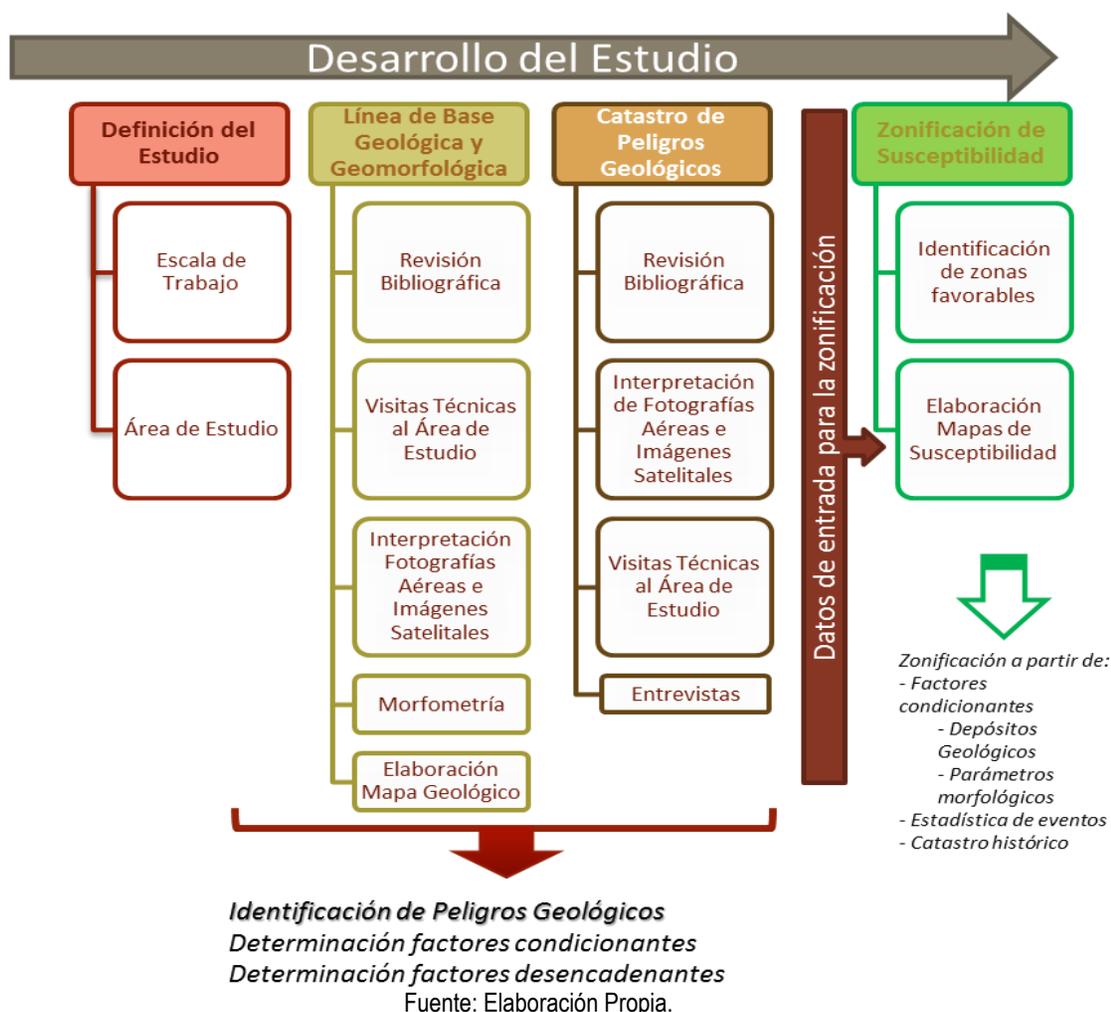
2 METODOLOGÍA

Con el fin de generar mapas de susceptibilidad para los sectores de interés de la comuna de Sierra Gorda, en orden de dar cumplimiento al Artículo 2.1.17 de la OGUC, se realizaron las siguientes tareas, tareas, las que se encuentran resumidas en la

FIGURA N° 2-1.

1. Definición del Estudio: Elección de la escala de trabajo y área a analizar.
2. Elaboración de una línea de base geológica y geomorfológica: El objetivo de este punto fue 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.
3. Visita técnicas de terreno al área de estudio.
4. Inventario de Peligros Geológicos: En esta tarea se recopilaron los distintos peligros geológicos que han afectado a la comuna de Sierra Gorda y a las zonas aledañas, con la finalidad de identificarlos, ubicarlos espacialmente y ordenarlos cronológicamente, si esto último es posible.
5. Catastro de Factores Condicionantes: se reunió información acerca de los factores intrínsecos (propios del medio físico) que condicionan la ocurrencia de un peligro geológico.

FIGURA N° 2-1 Diagrama de flujo del trabajo realizado



Finalmente, toda esta información fue utilizada para la elaboración de mapas de susceptibilidad para cada peligro geológico identificado en las áreas de estudio de detalle. A continuación, se detalla la metodología específica utilizada en cada una de las tareas nombradas previamente.

2.1 Definición del Área de Estudio.

El área de estudio corresponde a la comuna de Sierra Gorda, con énfasis en dos áreas de estudio de detalle que comprenden las localidades de Sierra Gorda y de Baquedano. La escala de análisis elegida para el desarrollo del estudio corresponde a la escala 1:1.000.000 para la comuna y una escala mayor a 1:100.0000 (1:50.000, 1:20.000, 1:10.000 y 1:5.000) para los dos sectores de detalle propuestos por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) de la Región de Antofagasta.

2.2 Elaboración de la línea de base geológica y geomorfológica

Las caracterizaciones geológica y geomorfológica se realizaron simultáneamente, utilizando los siguientes criterios:

1. Recopilación Bibliográfica.
2. Interpretación de imágenes satelitales.

3. Morfometría.
4. Elaboración mapa geológico y geomorfológico.

2.2.1 Recopilación Bibliográfica

Esta actividad incluyó tanto la recepción de la información provista por el mandante como la búsqueda de antecedentes en otras instituciones. Para la recopilación de información, se revisaron diversas fuentes, entre las que se incluyen publicaciones científicas e información generada por entidades públicas (SERNAGEOMIN, DGA, MINVU, MUNICIPALIDAD, etc.). El objetivo de esta búsqueda fue compilar la siguiente información:

- Cartografía base
- Imágenes satelitales
- Modelos de Elevación
- Caracterización geológica y geomorfológica
- Caracterización climatológica e hidrológica

La cartografía base utilizada para estudiar la comuna de Sierra Gorda corresponde a las cartas regulares del Instituto Geográfico Militar (IGM), que incluyen información a escala 1:50.000 sobre hidrografía, vialidad, cuencas, etc. Para analizar las áreas de estudio de detalle, se utilizó la cartografía base otorgada por Habiterra.

Las imágenes satelitales utilizadas corresponden a los catálogos de imágenes de Google Earth © y Bing Maps ©, que cubren distintos períodos de tiempo desde el año 1999 hasta el 2014; esto entrega casi 15 años de registro de imágenes satelitales.

Simultáneamente, se utilizó un Modelo de Elevación Digital (DEM, por sus siglas en inglés) SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), con un tamaño de celda de 30 m², para analizar la zona a nivel regional. El DEM corresponde a una matriz que contiene la información topográfica básica (elevación) que permitió estimar los parámetros morfométricos. Además, se construyó un DEM a partir de la información topográfica (curvas de nivel cada 0,5 m) entregada por Habiterra.

La caracterización geológica y geomorfológica se realizó simultáneamente. Para ello se usó como base la información del Mapa Geológico de Chile a escala 1:1.000.000 desarrollado por SERNAGEOMIN (2003) para la localidad de Sierra Gorda; mientras que para la localidad de Baquedano, se utilizó la Carta Baquedano a escala 1:100.000 elaborada por Basso (2004), complementado con los datos de SERNAGEOMIN (2003). El análisis y evaluación de las estructuras geológicas se realizó a partir de la información bibliográfica disponible: Arriagada *et al.* (2006), González *et al.* (2006), Carrizo *et al.* (2008), PMA-GCA (2008) y SERNAGEOMIN (2003).

Para la caracterización climatológica e hidrológica se realizó una recopilación de antecedentes bibliográficos de trabajos realizados dentro de la comuna y en sus alrededores. Para la recopilación de antecedentes hidrológicos se utilizaron estudios de la II Región elaborados por la DGA e información geológica recogida de SERNAGEOMIN (2003); para obtener información climatológica s

² <http://e4ftl01.cr.usgs.gov/SRTM/SRTMGL1.003/2000.02.11/>

consultó un informe de la DGA (1987), además de trabajos científicos a nivel regional (Inzunza, 2004).

La información recopilada corresponde a la información base que es analizada en el presente estudio, y es presentada como lista de referencias en el Capítulo 8 "REFERENCIAS". Además, la información fue sistematizada y georeferenciada en un Sistema de Información Geográfico.

2.2.2 Interpretación de fotografías aéreas e imágenes satelitales

Las imágenes satelitales recopiladas fueron analizadas, con el objetivo de complementar la información obtenida en terreno, la recopilación bibliográfica y el análisis morfométrico. La interpretación de imágenes satélites permitió delimitar los principales contactos entre el basamento rocoso y depósitos no consolidados activos e inactivos, tales como depósitos aluviales, depósitos coluviales, depósitos lacustres y gravas. Además, se identificaron los abanicos aluviales aportantes a las áreas de estudio de detalle, así como los cauces que han canalizado flujos superficiales en el pasado.

2.2.3 Morfometría

Los mapas morfométricos fueron derivados del modelo de elevación digital SRTM de 30 m/pixel. Se generaron cartas para diferentes parámetros morfométricos: cartas de pendiente, exposición de ladera y relieve sombreado. Estos mapas fueron utilizados como apoyo para la identificación de las principales formas del terreno (geomorfología) y los depósitos no consolidados. Además, durante el desarrollo del estudio, los parámetros morfométricos analizados fueron considerados como un factor condicionante para la elaboración de mapas de susceptibilidad.

2.2.4 Elaboración mapa geológico y geomorfológico

El mapa geológico tiene como objetivo identificar a las unidades de roca y a los depósitos sedimentarios no consolidados ubicados en el área de estudio. En el mapa geológico se da énfasis en la identificación de:

- Unidades de Roca: Corresponden a los afloramientos rocosos, los que serán clasificados de acuerdo a su edad y litología, y de ser posible, respecto a la calidad geotécnica del macizo rocoso.
- Depósitos Sedimentarios: Corresponde a sedimentos, total o parcialmente consolidados. Al desarrollar el mapa geológico se da énfasis en los depósitos sedimentarios dado que son el 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 coluvio.
- Depósitos Volcánicos recientes, producto de erupciones volcánicas, tales como depósitos de caída de ceniza, depósitos de flujos piroclásticos, depósitos de lahares y coladas de lava.

El mapa geomorfológico identifica las principales formas del terreno. Los mapas geológico y geomorfológico son utilizados en este informe como una cartografía de factores condicionantes, dado que permiten identificar:

- Zonas donde el macizo rocoso presenta una mala calidad que favorece la generación de procesos de remoción.

- Zonas donde se producen continuamente procesos de remoción en masa, tales como zonas de abanicos aluviales o conos de deyección coluviales.
- Zonas escarpadas, donde se producen continuamente procesos de remoción en masa que generan retroceso de laderas.
- Cauces activos y llanuras de inundación, que son afectadas continuamente por procesos de inundación por desborde de cauce.
- Zonas bajas y deprimidas, las que periódicamente son afectadas por anegamientos.
- Distintos niveles de terraza, que permiten ordenar de manera relativa qué sectores se inundarán primero y cuáles después, en caso de una inundación por desborde de cauce.

Toda esta información fue complementada con el trabajo realizado en terreno y con la información recopilada en entrevistas realizadas a los habitantes de las localidades en estudio.

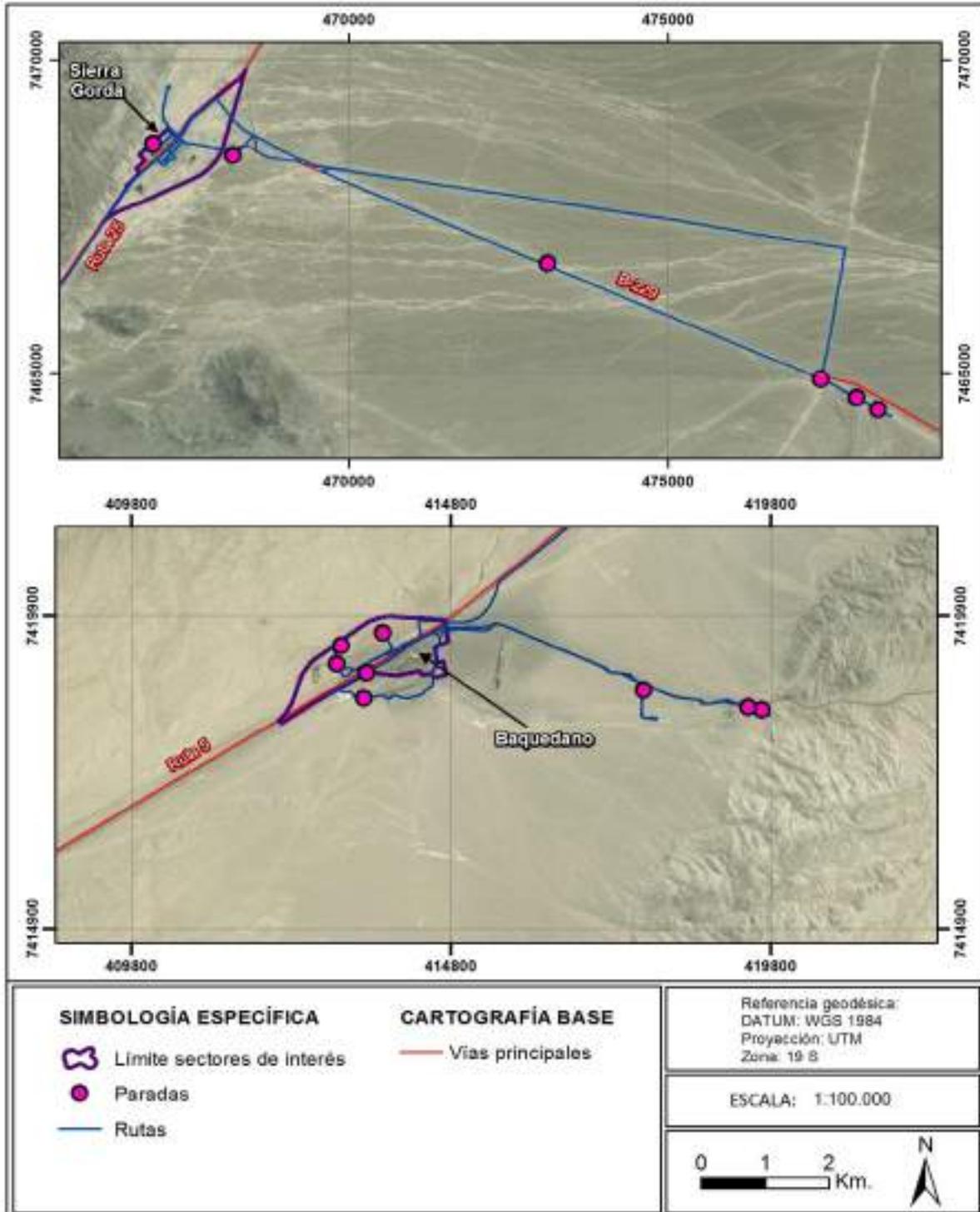
2.3 Visita técnica al área de estudio

Se realizó una visita a terreno al área de estudio el día 15 de diciembre de 2014 que consistió en un recorrido de la zona, con énfasis en los siguientes objetivos:

1. Identificar los sectores con presencia de peligros geológicos dentro de las localidades de Sierra Gorda y de Baquedano.
2. Complementar y validar la información obtenida en la recopilación bibliográfica

Los recorridos realizados la visita a terreno se muestran en la FIGURA N° 2-2 e incluyeron varios puntos de observación de detalle que fueron registrados mediante fotografías y en planos.

FIGURA N° 2-2 Recorrido realizado durante la visita a terreno a los sectores de interés de este informe el día 15 de diciembre del 2014



Fuente: Elaboración Propia.

2.4 Inventario de Peligros Geológicos

El inventario de peligros geológicos se realizó en base a una recopilación de antecedentes bibliográficos y registros históricos. 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.

Los peligros geológicos catastrados corresponden a aquellos contenidos dentro del artículo 2.1.17 de la OGUC, y fueron tratados con los nombres explicados en la Sección 1.4 “Marco Jurídico”, resumidos en el CUADRO N° 1-1.

Los peligros geológicos analizados corresponden a:

1. Procesos Endógenos: Actividad volcánica.
2. Procesos Endógenos: Actividad sísmica.
3. Procesos Exógenos: Inundaciones terrestres y litorales.
4. Procesos Exógenos: Remociones en masa.

Para la recopilación de información, se revisaron los antecedentes históricos de publicaciones científicas y libros, tales como por ejemplo Urrutia y Lanza (1993), González-Ferrán (1995), publicaciones del SERNAGEOMIN, entre otros, y se realizaron entrevistas a habitantes de los sectores estudiados. Las fuentes bibliográficas consultadas para catastrar cada tipo de peligro geológico fueron las siguientes:

1. Catastro de sismos e intensidades reportadas para distintos terremotos históricos. La generación del catastro de eventos sísmicos se realizó en base a recopilaciones históricas y de publicaciones científicas (Suárez y Comte (1993), Belmonte-Pool (1997), Tassara et al., (2006), Urrutia y Lanza (1993), entre otros) La base de datos de sismos utilizada para las representar los sismos históricos de la región es del National Earthquake Information Center (NEIC) del United States Geological Survey (USGS)³. 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.
2. Catastro de centros volcánicos. Para los eventos volcánicos se revisaron las fechas de registro de actividad y catastros de centros volcánicos presentados en Urrutia y Lanza (1993), González-Ferrán (1995) y Gardeweg et al. (1998).
3. Catastro histórico de fenómenos de remociones en masa. Se recopilaron datos de los procesos de remoción en masa a partir de la revisión bibliográfica de Urrutia y Lanza (1993) y de diarios locales, como el Diario El Mercurio de Calama (2007), Diario El Mercurio de Antofagasta (2002, 2011), Diario La Estrella de Tocopilla (2013).
4. Catastro histórico de inundaciones y anegamientos en la zona. Se recopiló información sobre los temporales que han afectado la comuna de Sierra Gorda desde 1980 que podrían

³Disponible en línea en: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/>

haber generado inundaciones en la zona. Las fuentes consultadas fueron: Urrutia y Lanza, (1993), el Diario El Mercurio de Antofagasta (2002) y el Diario La Estrella de Tocopilla (2013).

La información recopilada es presentada en el Capítulo 4 “INVENTARIO DE PELIGROS GEOLÓGICOS”. Además, cuando la calidad de la información lo permitió, la información fue parcialmente sistematizada y georeferenciada en un Sistema de Información Geográfico.

2.5 Catastro de Factores Condicionantes

A partir de la línea de base geológica y geomorfológica, y el inventario de peligros geológicos, se identifican de manera preliminar una serie de factores considerados condicionantes para la ocurrencia de remociones en masa e inundaciones en las áreas de estudio de detalle. Esto con el objetivo de determinar posteriormente cuáles son las áreas más susceptibles a ser afectadas por este tipo de eventos. Para ello, se recopiló una serie de mapas de factores considerados condicionantes para la ocurrencia de un peligro geológico dado, como mapas de elevación, de pendiente y de dirección de drenaje de la ladera (exposición). Fueron elaborados a partir del modelo de elevación digital construido con la información topográfica (curvas de nivel cada 0,5 m) otorgada por Habiterra.

2.6 Diagnóstico de Susceptibilidad

De acuerdo a los objetivos planteados en esta etapa, se contempla una zonificación de susceptibilidad a los peligros geológicos que puedan afectar a las áreas de estudio de detalle.

Con base en la interpretación de imágenes satelitales, en la geología y la geomorfología de la zona y en la información recopilada durante la visita a terreno, se establecieron dos categorías de susceptibilidad (“Alta” y “Moderada”) a inundaciones para cada localidad (Sierra Gorda y Baquedano) y a remociones en masa (solo para Baquedano), cuyos criterios de clasificación son explicados en la Secciones 5.2.1 y 5.2.2, respectivamente.

En el caso de la susceptibilidad a inundaciones, el estudio se abordó según dos escalas de mapeo distintas: zonificación de abanicos aluviales aportantes (a escala 1:50.000) y zonificación de susceptibilidad local (a escala 1:5.000).

3 LÍNEA DE BASE

3.1 Marco Geodinámico

Chile se ubica en un margen convergente de placas tipo océano-continente (FIGURA N° 3-1), 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).

La zona ubicada al norte de los 27°S, dentro del esquema de segmentación andina de Mpodozis y Ramos (1989), se identifica como una zona de subducción normal con un ángulo de subducción de aproximadamente 30°. El margen Oeste de la placa Sudamericana tiene un rumbo aproximado NS a lo largo de toda la región, desde los 18,5°S, en la zona del denominada “codo de Arica”, hacia el sur. Al norte de esta latitud cambia su orientación a NW. Las principales unidades morfoestructurales que constituyen en margen continental Chileno en esta zona corresponden, de oeste a este, a la Cordillera de la Costa, la Depresión Central, la Cordillera Occidental y el Altiplano. Más hacia el este se desarrollan, además, la Cordillera Oriental seguida de las Sierras Subandinas, que enfrentan el Cratón Brasileño. La Cordillera Occidental y, en menor medida, el Altiplano y la Cordillera Oriental, son las unidades que hospedan el actual arco volcánico activo.

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 mayoría de estos sismos y los eventos de gran 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).

FIGURA N° 3-1 Marco geodinámico representado en3D.



FUENTE: Elaboración propia.

Nota: La Dorsal de Juan Fernández es subductada a los 33° S. La línea verde señala la fosa, lugar donde subducta la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, y las flechas muestran las direcciones y velocidades de convergencia entre ambas.

3.2 Marco Geomorfológico.

3.2.1 Unidades morfoestructurales.

El segmento andino chileno, entre los 19°S y los 24°S, muestra 4 unidades morfoestructurales principales, dispuestas en franjas sub paralelas orientadas N-S. De oeste a este, se ordenan de la siguiente manera: Cordillera de la Costa, Depresión Central, Precordillera (que incluye la Cordillera de Domeyco) y Cordillera Occidental. En la latitud del área de estudio (23°S), entre estas últimas dos unidades, se ubica la Depresión Preandina, en cuyo interior se desarrollan una serie de salares, siendo el Salar de Atacama el de mayor extensión. En la comuna de Sierra Gorda, se reconocen la Cordillera de la Costa, Depresión Central y Precordillera (FIGURA N° 3-2).

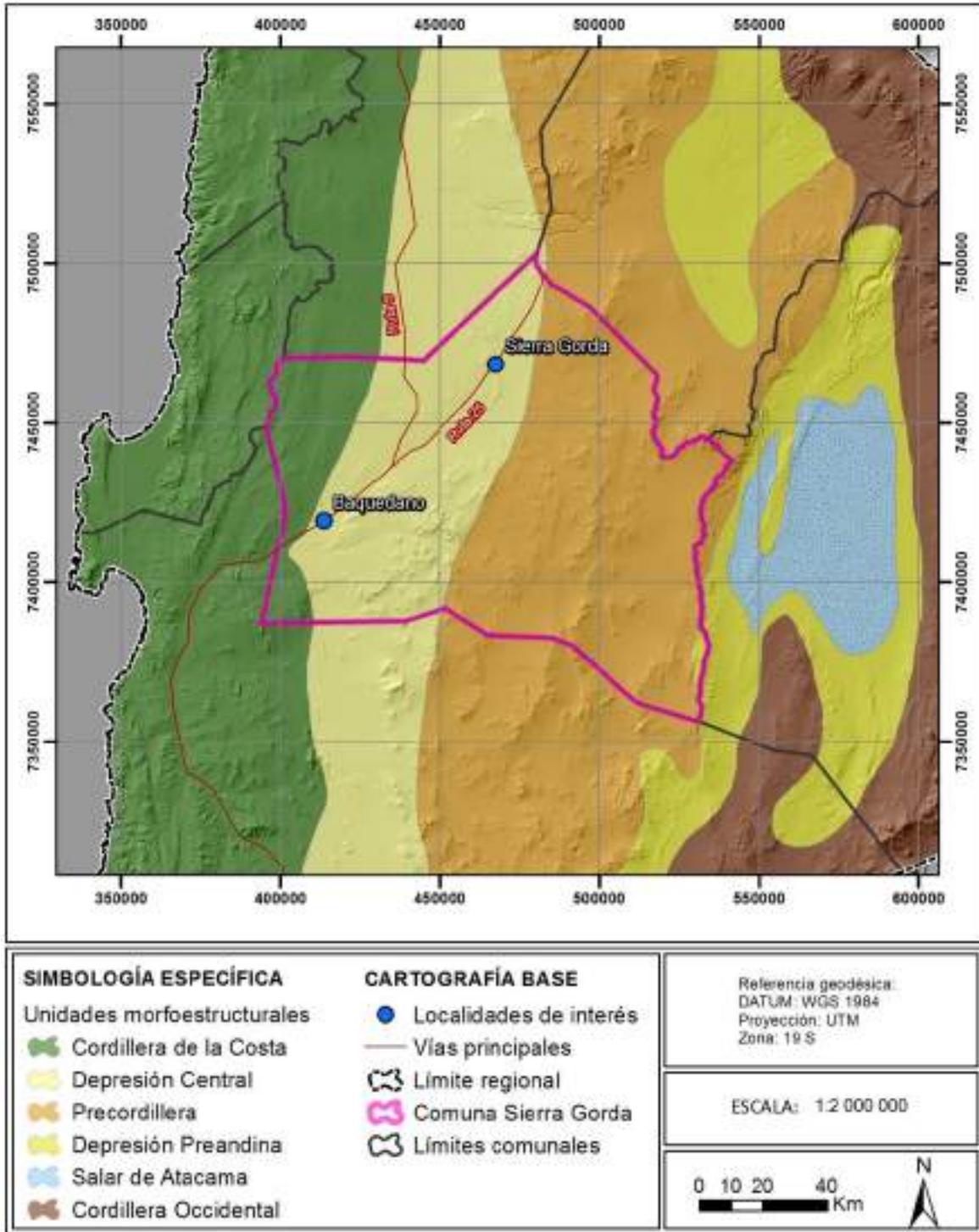
En los alrededores de la comuna, la Cordillera de la Costa alcanza alturas de 2.000 m s.n.m. aproximadamente, y hacia el oeste, se encuentra limitada por dos unidades morfoestructurales menores: el Escarpe Costero y las Planicies Litorales.

Las localidades de Sierra Gorda y Baquedano se ubican íntegramente en la Depresión Central, la cual corresponde a una morfoestructura elongada, relativamente plana, cuya extensión E-W no supera los 50 km de ancho. Entre los 19°S y los 22°S, en el extremo norte de Chile, esta unidad se distingue claramente, formando parte del piedemonte andino: nace en las faldas de la Precordillera y se extiende en planos levemente inclinados hacia el oeste, hasta alcanzar el flanco oriental de la Cordillera de la Costa (Börgel, 1983). Sin embargo, a los 23°S, esta unidad se ve interrumpida por una extensa red de Cerros Isla, otorgándole al paisaje una morfología de serranía.

Al oriente, la Precordillera se presenta como una unidad morfológica accidentada, que alcanza hacia el este altitudes progresivamente mayores, y en la cual se incluye la Cordillera de Domeyco. Esta cordillera presenta una altura promedio de 3000 m s.n.m, llegando a altitudes que superan los 4000 m s.n.m, y conforma el borde occidental de la cuenca del Salar de Atacama.

El relieve de la comuna de Sierra Gorda se caracteriza por presentar extensas zonas planas de pendientes menores a 10°, las cuales son interrumpidas por accidentes topográficos de pendientes mayores, tales como las serranías de la Depresión Central y los cerros de la Precordillera (FIGURA N° 3-4).

FIGURA N° 3-2 Unidades morfoestructurales a nivel regional



Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Morfometría

En la FIGURA N° 3-3, FIGURA N° 3-4 y FIGURA N° 3-5, se presentan la carta de elevaciones, carta de pendientes y carta de exposición de la comuna de Sierra Gorda, respectivamente. Estas cartas fueron obtenidas a partir de un modelo de elevación SRTM (Shuttle Radar Topography Mission, por sus siglas en inglés), de 30 m/pixel.

Las elevaciones de la comuna de Sierra Gorda varían entre los 685 m s.n.m y los 4283 m s.n.m, con un promedio de elevación de 2025 m s.n.m (CUADRO N° 3-1). A partir de la FIGURA N° 3-3, se aprecia que las elevaciones se hacen progresivamente mayores hacia el oriente de comuna, manifestándose una pendiente regional suave de 1,45°.

CUADRO N° 3-1 Estadígrafos de la carta de elevaciones.

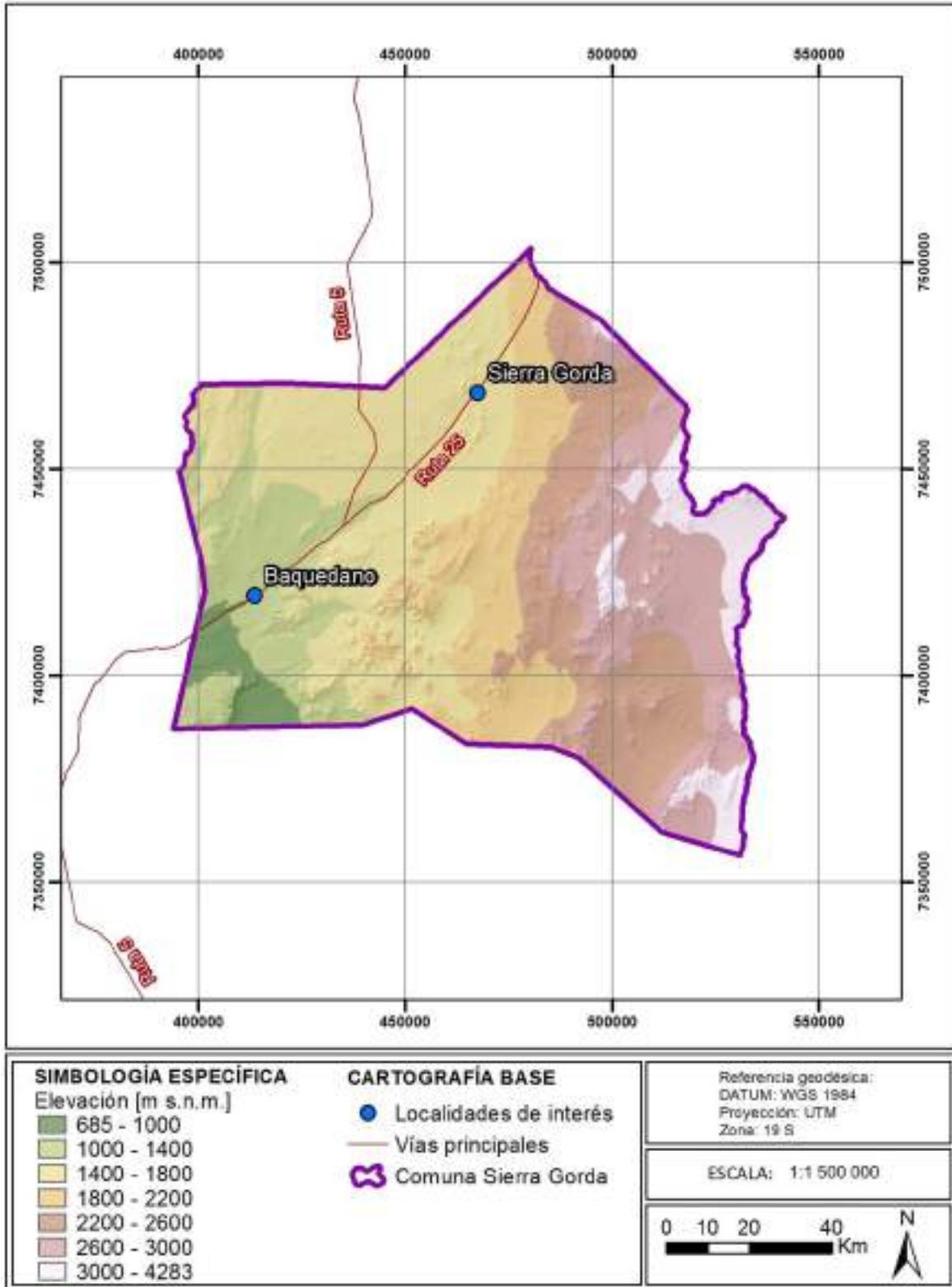
Atributo	SRTM	Altitud	%
Celdas	14.259.935	685 - 1400	15,16
Mínimo	685 m s.n.m.	1400 - 2200	45,24
Máximo	4283 m s.n.m.	2200 - 3000	32,6
Promedio	2025 m s.n.m.	3000 - 4283	7
Desv. Est.	630	Total	100

Por su parte, las pendientes locales varían entre 0° y 62,33°, con un promedio de 4,35°. Cabe destacar que más del 90% de la comuna, posee pendientes que no superan los 10° (CUADRO N° 3-2), evidenciando que la comuna corresponde a un territorio prácticamente plano, que se ve interrumpido por la extensa red de Cerros Isla de la Depresión Central y Precordillera, así como por las altas cumbres de la Cordillera de Domeyko.

CUADRO N° 3-2 Estadígrafos de la carta de pendientes.

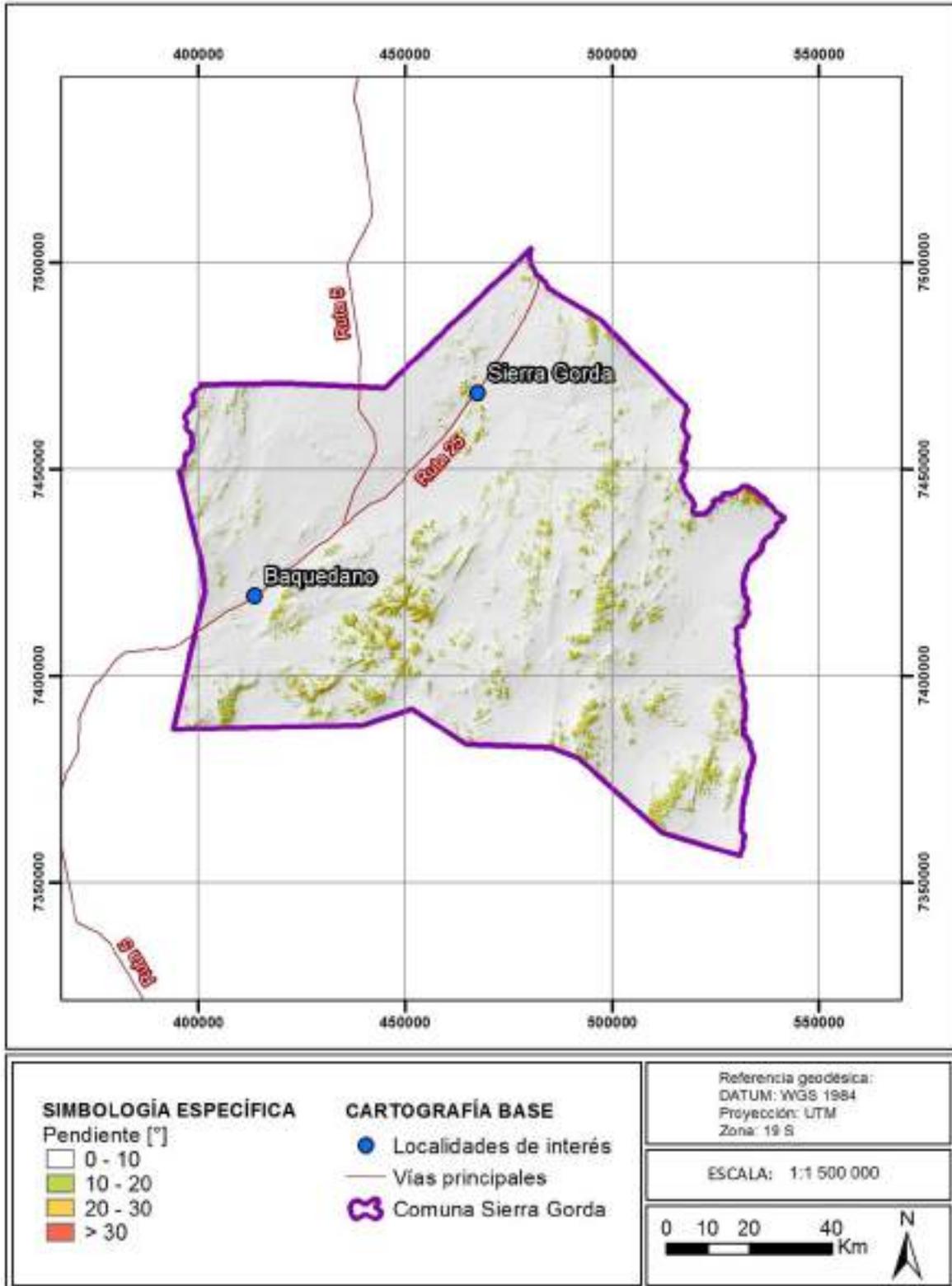
Atributo	SRTM	Pendiente	%
Celdas	14.259.935	0 - 10	91,56
Mínimo	0	10 - 20	6,95
Máximo	62,33	20 - 30	1,39
Promedio	4,35	> 30	0,1
Desv. Est.	4,16	Total	100

FIGURA N° 3-3 Carta de elevaciones de la comuna de Sierra Gorda



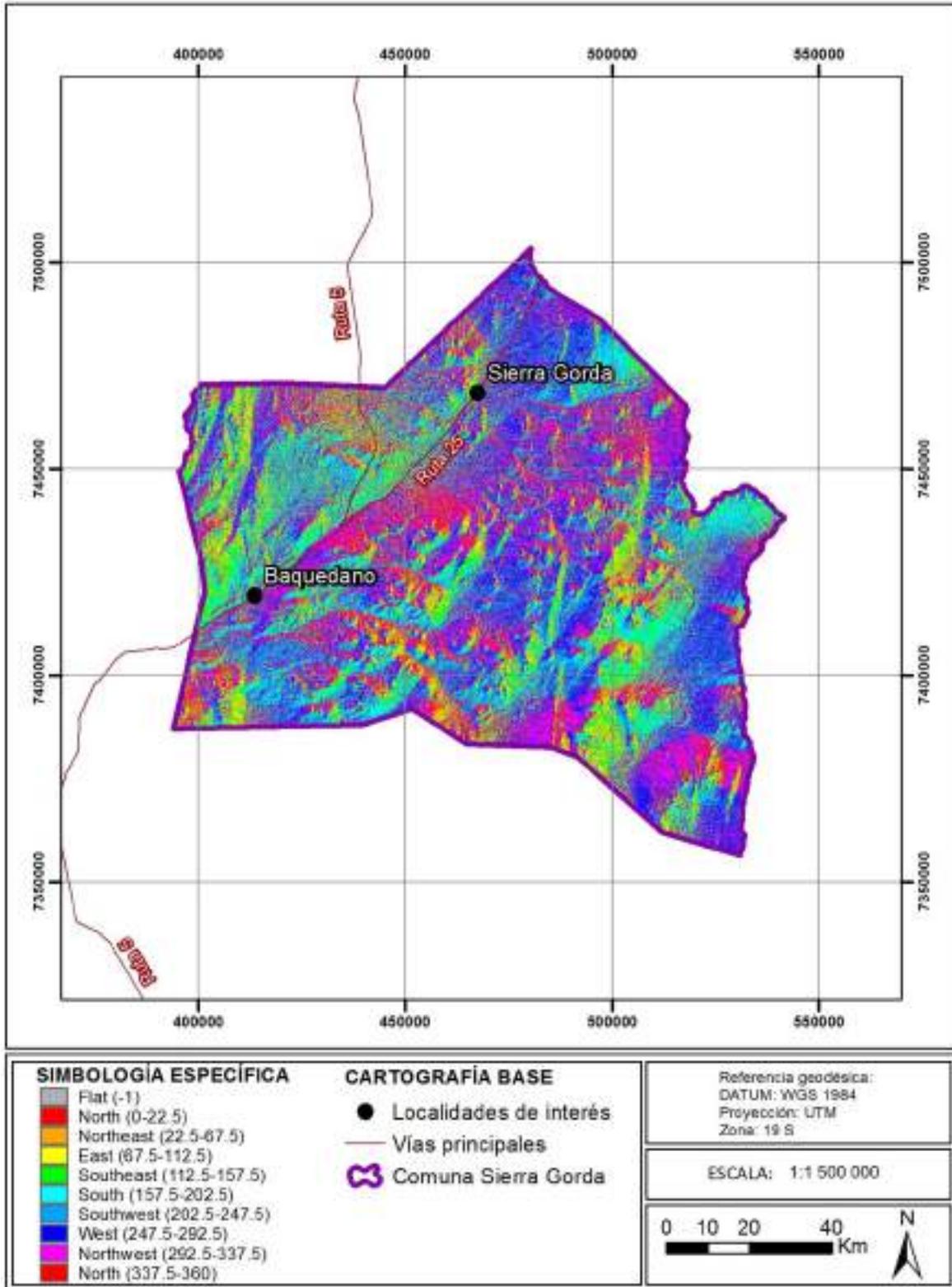
Fuente: Elaboración propia a partir de un modelo de elevación SRTM de 30 m/píxel.

FIGURA N° 3-4 Carta de pendientes de la comuna de Sierra Gorda



Fuente: Elaboración propia a partir de un modelo de elevación SRTM de 30 m/píxel.

FIGURA N° 3-5 Carta de exposición de laderas de la comuna de Sierra Gorda



Fuente: Elaboración propia a partir de un modelo de elevación SRTM de 30 m/píxel.

3.3 Marco Geológico

3.3.1 Marco Geológico Regional.

Según lo presentado por Charrier (2007), la geología de la Región de Antofagasta (y en particular la de la comuna de Sierra Gorda) muestra la evolución del margen oeste de Sudamérica durante los ciclos tectónicos pre-Andino (en menor medida) y Andino, en que, desde el Cretácico Superior, el arco volcánico ha ido desplazándose progresivamente hacia el este.

En el período comprendido entre el Jurásico Inferior tardío y el Cretácico Inferior tardío, se desarrollan un arco magmático de orientación principal norte-sur a lo largo de la actual Cordillera de la Costa, el cual se manifiesta en una serie de rocas volcánicas (Fm. La Negra) e intrusivas (Batolito Oficina Ercilla), y una cuenca de trasarco donde se depositan importantes sucesiones sedimentarias.

Entre el Cretácico Inferior tardío y el Cretácico Superior, el arco migra hacia el este y se desarrollan una serie de rocas volcánicas (Fm. Quebrada Mala) e intrusivas (como el Batolito el Buitre). Durante el Paleógeno Inferior, el arco volcánico se vuelve a ubicar más al este, y su desarrollo está acompañado por el emplazamiento de una serie de unidades intrusivas.

Entre el Paleógeno Superior y la actualidad, se produce el alzamiento de la Cordillera de Los Andes, se desarrollan las unidades morfoestructurales que se reconocen actualmente, el arco volcánico se ubica en su posición actual (fuera del área de estudio) y se emplazan los depósitos de pórfidos de cobre de edad post-Incaica.

Como respuesta a este alzamiento, a partir del Mioceno Inferior se depositan importantes sucesiones de depósitos aluviales (Gravas de Atacama, Gravas de Baquedano y posteriores).

En la comuna de Sierra Gorda, aproximadamente a 35 km al sureste de la localidad homónima, se ubica el sector denominado Caracoles, el más famoso depósito fosilífero del área, y debe su nombre a la gran cantidad de fósiles del período Jurásico Medio a Tardío, entre los 180 y 142 Ma. Es tal su importancia que es considerado una localidad única a nivel sudamericano por su riqueza en fósiles, y ha servido como referente para la reconstrucción estratigráfica de esas antiguas épocas del continente. Los restos, en su mayoría, corresponden a fósiles de invertebrados marinos tales como cefalópodos (amonites) y bivalvos. Como dato anecdótico, la presencia de estos elementos en este lugar da origen al nombre del yacimiento de plata de "Caracoles", asociado a rocas sedimentarias marinas litorales del Jurásico asignadas al Grupo Caracoles. Fue descubierto y explotado inicialmente a finales del siglo XIX.

A continuación se presentan los marcos geológicos de las localidades de Sierra Gorda y Baquedano, con mapas geológicos a escala 1:100.000, los cuales fueron elaborados a partir de SERNAGEOMIN (2003) y Basso (2004), respectivamente.

3.3.2 Marco Geológico de la localidad de Sierra Gorda (basado en SERNAGEOMIN (2003))

3.3.2.1 Unidades de rocas estratificadas

- Secuencias sedimentarias continentales (Jurásico Superior – Cretácico Inferior): corresponden a secuencias sedimentarias continentales aluviales, fluviales y eólicas, en

parte transicionales: areniscas, limolitas, lutitas y conglomerados rojos. Se reconocen al NNE de la localidad de Sierra Gorda.

3.3.2.2 Unidades de rocas intrusivas

- Intrusivos del Paleoceno (65 – 53 Ma): monzodioritas de piroxeno y biotita, granodioitas y granitos de hornblenda y biotita; pórfidos dacíticos y riolíticos asociados a mineralización tipo pórfido cuprífero y chimeneas de brechas. Se observan inmediatamente al oriente y sur de la localidad de Sierra Gorda.

3.3.2.3 Depósitos no consolidados

- Gravas de Atacama (Mioceno Inferior – Medio): secuencias sedimentarias de abanicos aluviales, pedimento o fluviales: gravas, arenas y limos con ignimbritas intercaladas. Se observan al oriente de la localidad de Sierra Gorda, en las cercanías de la mina “El Tesoro” (FIGURA N° 3-6).

FIGURA N° 3-6 Depósitos no consolidados asociados a las Gravas de Atacama



Fuente: Archivo fotográfico de terreno

- Depósitos aluviales y coluviales antiguos (Mioceno Inferior – Medio): secuencias sedimentarias clásticas de piedemonte, aluviales, coluviales o fluviales: conglomerados, areniscas y limolitas. Se identifican inmediatamente al occidente de la localidad de Sierra Gorda, así como también hacia el sur y oriente de la misma.
- Depósitos aluviales y coluviales recientes (Pleistoceno - Holoceno): depósitos aluviales, subordinadamente coluviales o lacustres: gravas, arenas y limos depositados en ambientes

de abanicos aluviales. Según el mapeo regional del SERNAGEOMIN (2003), la localidad de Sierra Gorda se asienta sobre esta unidad geológica, específicamente en la parte distal de abanicos aluviales que desarrollan una marcada coalescencia en las que se observan grietas de desecación (FIGURA N° 3-7).

FIGURA N° 3-7 Grietas de desecación en depósitos aluviales y coluviales recientes.



Fuente: Archivo fotográfico de terreno

- Depósitos finos (probablemente Holoceno): facies distales de los abanicos aluviales correspondientes a la unidad de “Depósitos aluviales y coluviales principales”, en las que se depositan sedimentos finos, tales como arenas y limos (FIGURA N° 3-8). Según este estudio, la localidad de Sierra Gorda se asienta íntegramente sobre esta unidad geológica.

FIGURA N° 3-8 Depósitos finos sobre los cuales se asienta la localidad de Sierra Gorda



Fuente: Archivo fotográfico de terreno

3.3.3 Marco Geológico de la localidad de Baquedano (basado en Basso (2004))

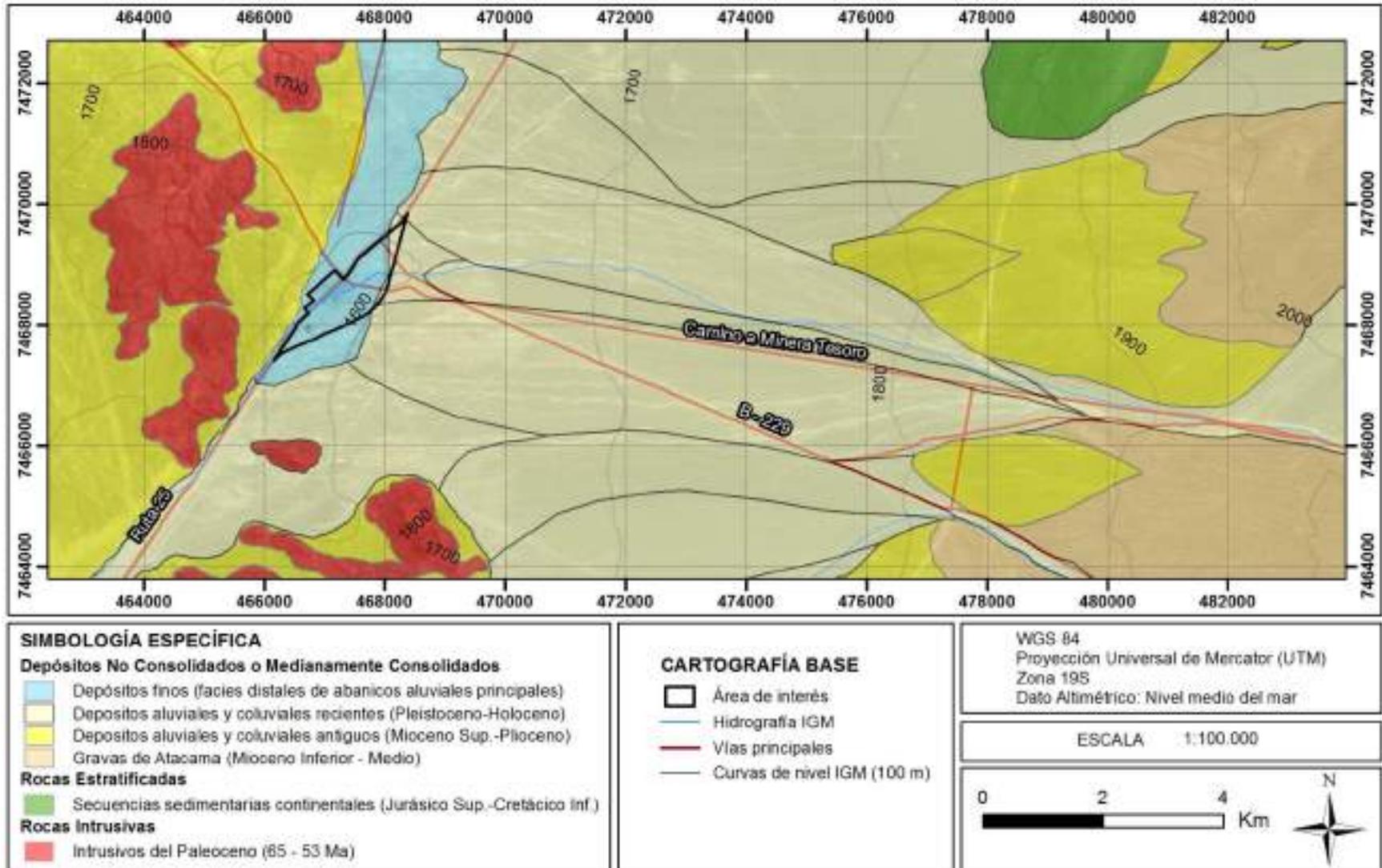
3.3.3.1 Unidades de rocas estratificadas

- Formación La Negra (Jurásico Inferior – Superior): corresponde a una secuencia volcánica continental compuesta por brechas volcánicas masivas, tobas riolíticas soldadas y andesitas basálticas de piroxenos. Estas rocas afloran al oriente de la localidad de Baquedano.
- Estratos de la Quebrada San Cristóbal (Cretácico Inferior – Superior): secuencia volcánica continental correspondiente a brechas volcánicas masivas, tobas líticas riolíticas soldadas, lavas andesíticas de anfíbolos y piroxenos, así como también marginalmente conglomerados con bancos de areniscas rojas y calizas laminadas. Estas secuencias se observan al SE del área de interés.

3.3.3.2 Unidades de rocas intrusivas

- Batolito Oficina Ercilla (191 – 181 Ma): fuera del área de interés, al NNW de la localidad de Baquedano, aflora un miembro del batolito compuesto por dioritas, dioritas cuarcíferas y microdioritas de anfíbolos y piroxenos.

FIGURA N° 3-9 Mapa Geológico 1:100.000 de la localidad de Sierra Gorda. Se marcan los abanicos aluviales coalescentes próximos a la localidad.



Fuente: Elaboración propia a partir de SERNAGEOMIN (2003).

- Batolito Sierra del Buitre (69 – 61 Ma): se subdivide en un miembro de monzodioritas cuarcíferas a granodioritas, y otro de dioritas, dioritas cuarcíferas y microdioritas. Aflora al oriente de la localidad de Baquedano, instruyendo a las rocas de la Formación La Negra.

3.3.3.3 Depósitos no consolidados

- Gravas de Baquedano (Mioceno Inferior – Medio): se compone de gravas y arenas conglomerádicas parcialmente consolidadas, con intercalaciones de tobas cineríticas de caída. Esta unidad se observa dentro del área de interés, en suaves lomajes al noroeste de la Ruta 5.
- Depósitos aluviales y coluviales antiguos (Mioceno Superior – Pleistoceno): corresponde a gravas, arenas y limos semiconsolidados, con intercalaciones de tobas cineríticas de caída (FIGURA N° 3-10). Estos depósitos se reconoce dentro del área de interés.

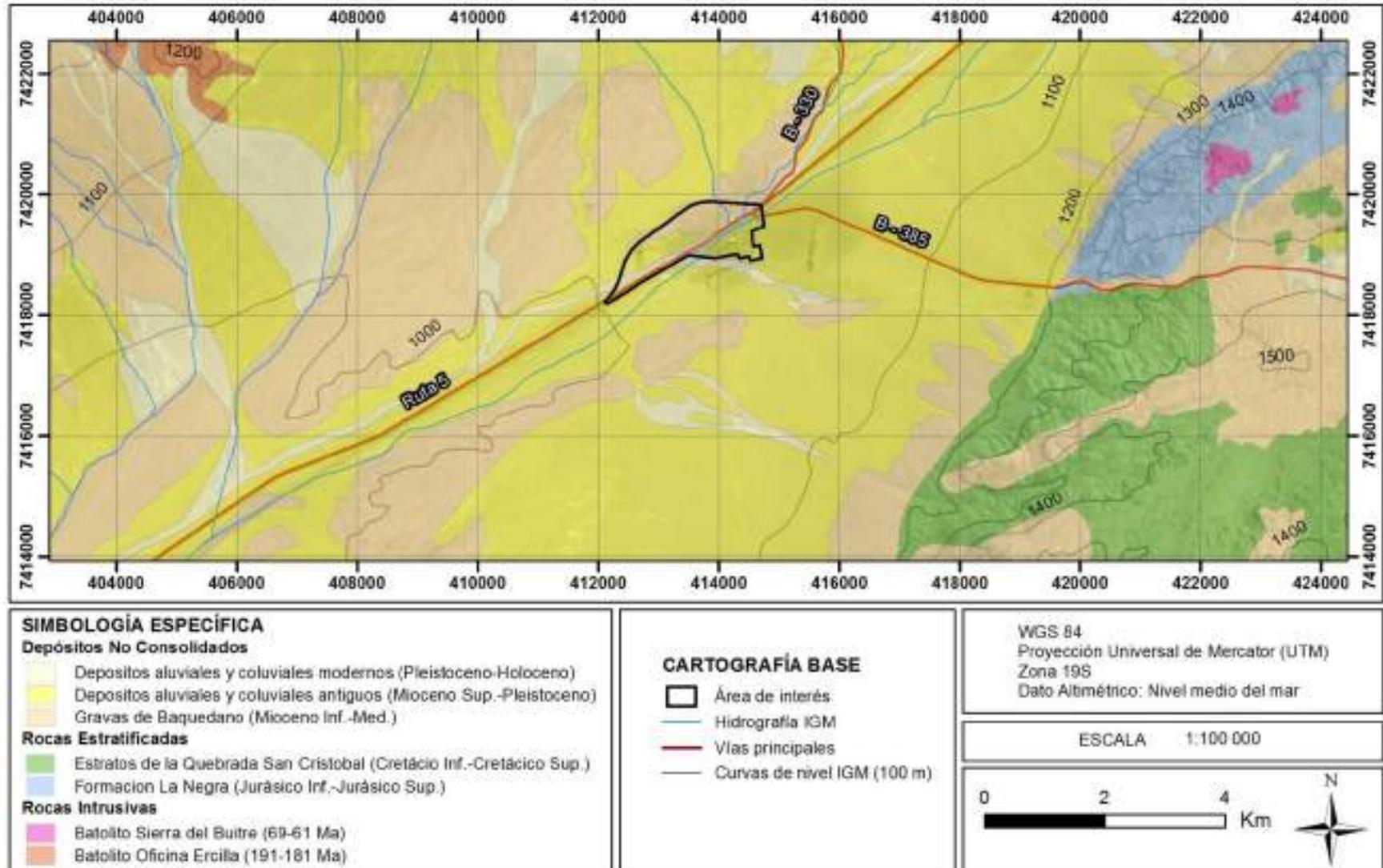
FIGURA N° 3-10 Depósitos aluviales y coluviales antiguos



Fuente: Archivo fotográfico de terreno

- Depósitos aluviales y coluviales modernos (Pleistoceno - Holoceno): se componen de gravas, arenas limos y arcillas. Corresponden a depósitos no consolidados, pobremente estratificados, y evidencian el transporte de los últimos flujos de aguas. Aflora dentro del área de interés, sub paralelo a la Ruta 5.

FIGURA Nº 3-11 Mapa geológico 1:100.000 de la localidad de Baquedano y sus alrededores.



Fuente: Elaboración propia a partir de Basso (2004).

3.3.4 Estructuras

El análisis y evaluación de las estructuras se realizó a partir de la información bibliográfica disponible: Arriagada *et al.* (2006), González *et al.* (2006), Carrizo *et al.* (2008), PMA-GCA (2008) y SERNAGEOMIN (2003).

A escala regional, la principal estructura reconocida es el Sistema de Falla de Atacama (AFS, por sus siglas en inglés), de orientación norte-sur y ubicada en la Cordillera de la Costa, al oeste de la comuna de Sierra Gorda (FIGURA N° 3-12). El AFS Corresponde a un sistema de fallas inversas, normales y/o de rumbo, que no han sido estudiadas en detalle y que presentan movimiento desde el Jurásico Inferior. Este sistema de falla presenta indicios de actividad durante el Pleistoceno (?) – Holoceno (?).

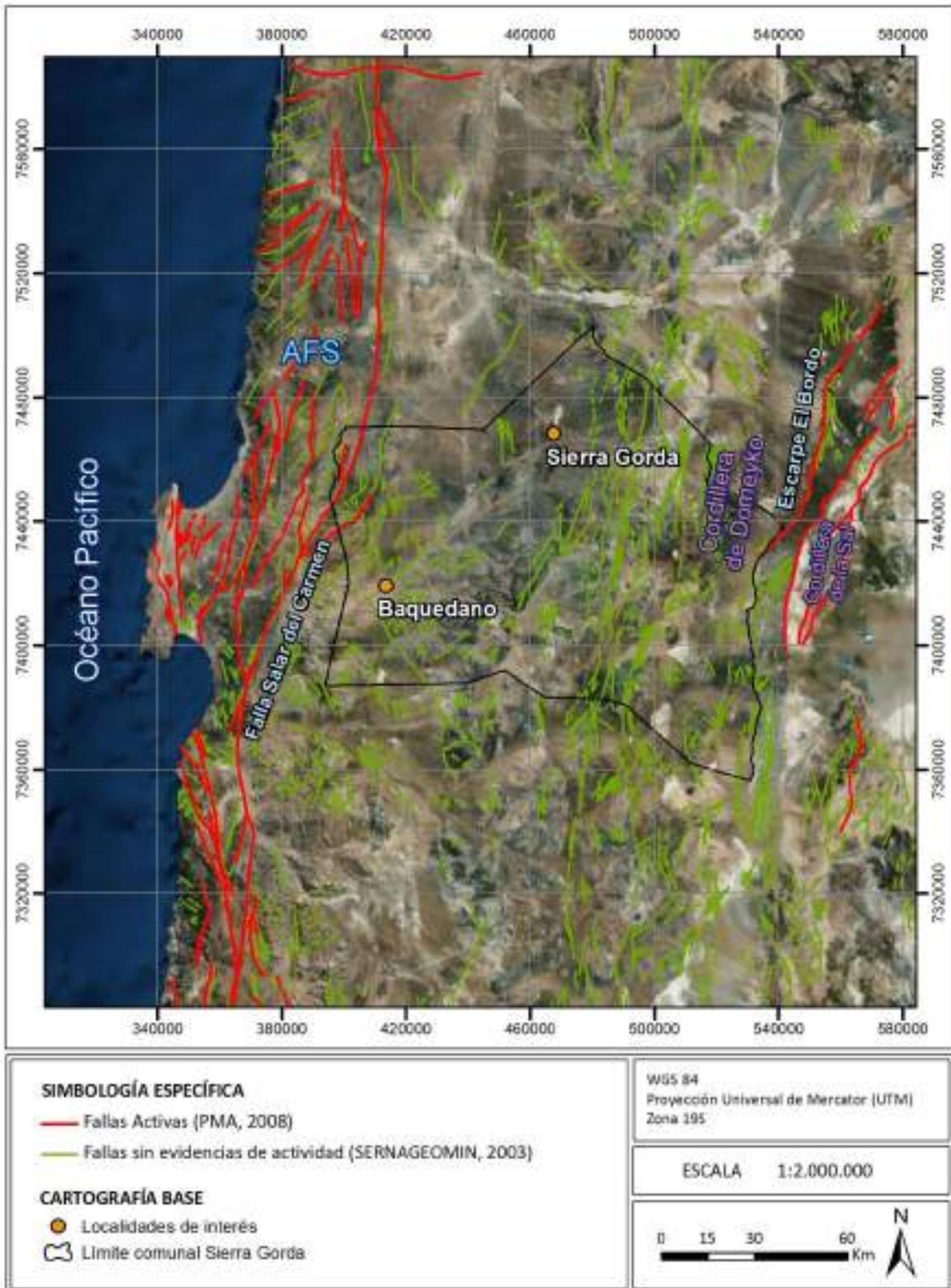
Dentro del AFS, existe una estructura de orientación NNE, que presenta movimiento de rumbo reconocido durante el Pleistoceno, asociado a una transpresión dextral, y que está representada por la Falla Salar del Carmen (FIGURA N° 3-12). En ella, se reconocen planos de ruptura paralelos, y escarpes de falla frescos con rechazo de hasta 10 m, además de rupturas recientes con escarpes de hasta 70 cm.

En la Precordillera (particularmente en la Cordillera de Domeyko), así como al interior de la cuenca del Salar de Atacama (en lo que se conoce como la Cordillera de la Sal), se reportan fallas inversas de dirección NNE-SSW, con movimientos desde el Mioceno, y cuya actividad ha tenido como consecuencia el alzamiento de ambos bloques estructurales. El escarpe El Bordo constituye el flanco oriental de la Cordillera de Domeyko, y corresponde a un resalto topográfico de hasta 900 m de altura, que se extiende por más de 120 km hacia el sur. A través de este escarpe, en algunos sectores se puede proyectar la traza de una falla inversa y de vergencia este, la cual conforma el rechazo oriental de dicha cordillera (FIGURA N° 3-12).

Distribuidas en la Cordillera de la Costa, la Depresión Central y la Precordillera, se reconocen fallas inversas, normales y/o de rumbo que no presentan indicios de actividad en el Pleistoceno – Holoceno, por lo que al momento de este estudio se consideran inactivas (FIGURA N° 3-12). Cabe señalar que, en el pasado, la actividad de estas fallas habría tenido un rol preponderante en la conformación de los Cerros Islas y Sierras que actualmente configuran el relieve de la región, tales como las sierras Valenzuela, Rencoret, del Buitre y Gorda.

La localidad de Sierra Gorda se ubica a 60 km de la traza de la Falla Salar del Carmen, y a 80 km del escarpe El Bordo, mientras que la localidad de Baquedano se ubica a 30 km de la primera, y a más de 100 km de la segunda (FIGURA N° 3-12).

FIGURA N° 3-12 Fallas activas e inactivas que se encuentran cercanas a la comuna de Sierra Gorda



Fuente: Elaboración propia a partir de PMA (2008) y SERNAGEOMIN (2003)

3.4 Marco Climático

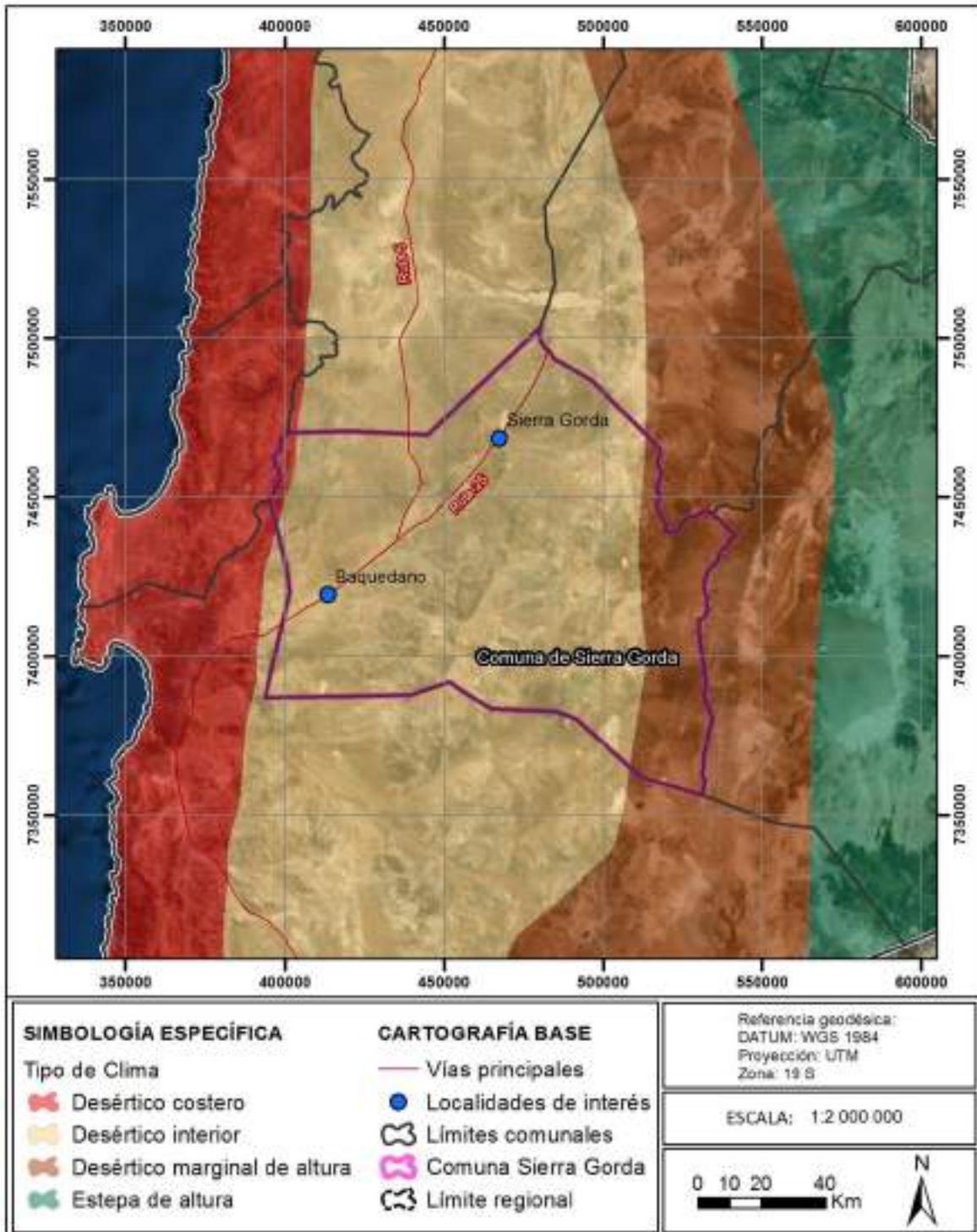
Según la clasificación de Koeppen, la Región de Antofagasta presenta 4 tipos de climas desérticos, los cuales se disponen en franjas sub paralelas E-W en el siguiente orden: Desértico Costero Nuboso, Desértico Interior, Desértico Marginal de Altura y Estepa de Altura (FIGURA N° 3-13).

Las localidades de Baquedano y Sierra Gorda, así como prácticamente la totalidad de la comuna de Sierra Gorda, presentan un clima Desértico Interior (también conocido como “Desértico Normal”). Este se caracteriza por su aridez extrema, escasa humedad relativa, gran sequedad atmosférica y una marcada oscilación térmica entre el día y la noche. Las temperaturas diurnas máximas superan los 30°C, mientras que por la noche descienden a 1°C, o incluso menos. Esta amplitud de oscilación térmica se destaca en los meses invernales, en los que se observan un fuerte enfriamiento nocturno (Inzunza, 2004). Según el informe de la DGA (1987), las tasas de precipitaciones son cercanas a cero, y las de evapotranspiración llegan a superar los 3000 mm/año (FIGURA N° 3-14).

Dado que existen estaciones meteorológicas tanto en la localidad de Sierra Gorda como en la de Baquedano, se tienen registros de temperatura y precipitaciones para ambas áreas de interés (FIGURA N° 3-15). En ambas localidades se observa un descenso en las temperaturas medias en los meses invernales (junio a agosto), y un aumento de las mismas en los meses de verano (diciembre a marzo). En cuanto a las precipitaciones, estas son extremadamente bajas (< 0.5 mm/mes), siendo posible notar el efecto del “Invierno Altiplánico” en la localidad de Sierra Gorda.

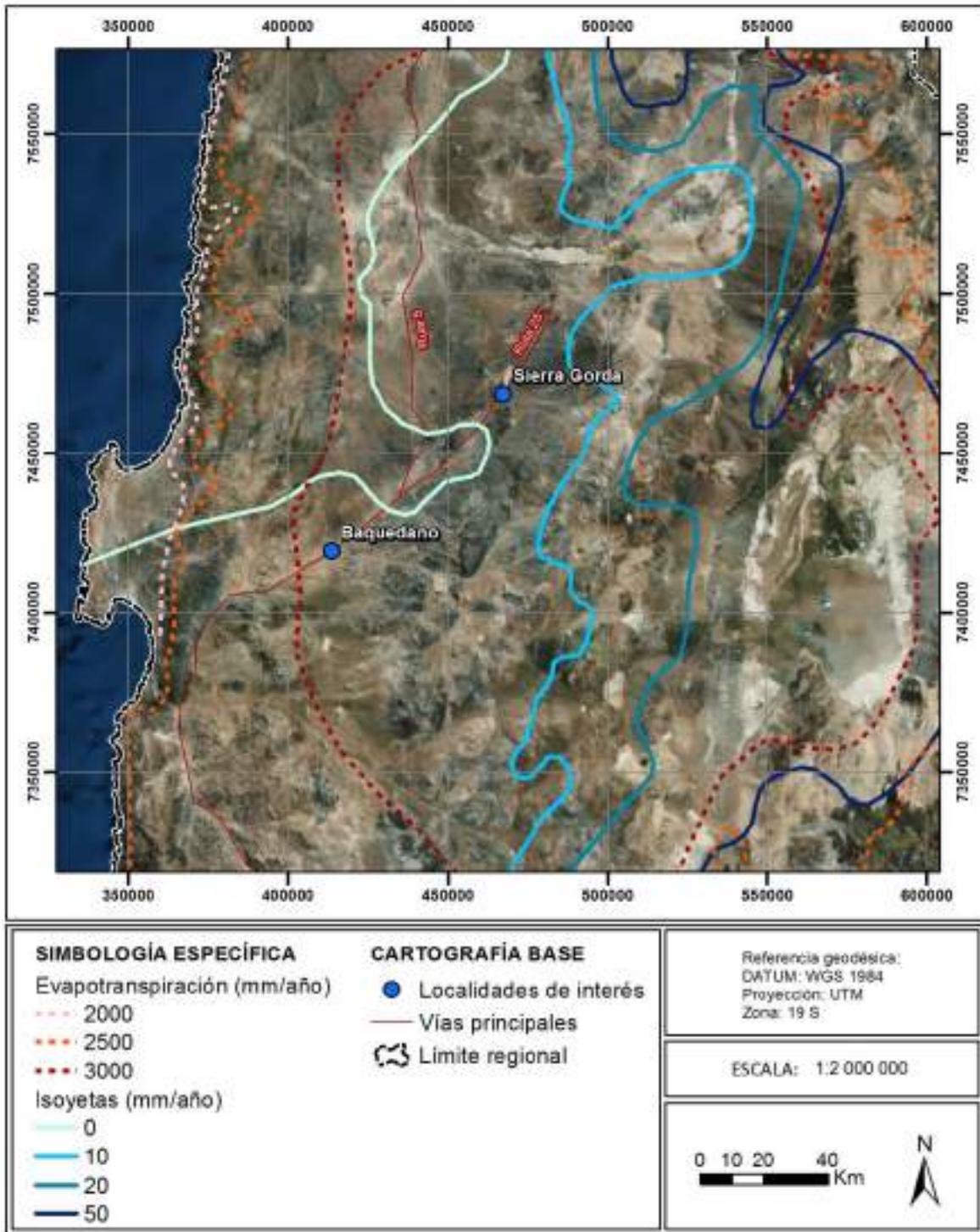
En el norte de Chile, el “Invierno Altiplánico” se asocia al clima desértico y esteárico, marginal de altura. Que caracteriza principalmente al clima de la región altiplánica, al límite con Bolivia y Argentina, en alturas cercanas a los 4.000 m s.n.m., y se caracteriza porque el efecto de la altura es dominante: la temperatura desciende, el aire es seco y de una densidad menor con respecto a las condiciones costeras. Las temperaturas mínimas diarias son, en general, inferiores a 0°C, alcanzando valores incluso menores a -10°C durante el invierno. El periodo de lluvias se concentra en el verano (diciembre a marzo), debido al ingreso de masas de aires húmedos provenientes desde la cuenca amazónica. A diferencia de las lluvias asociadas a sistemas frontales, en esta región la precipitación se asocia a la formación de nubosidad cumuliforme durante la tarde, cuando el calentamiento del suelo favorece el desarrollo de movimientos ascendentes. La influencia del Invierno Boliviano disminuye gradualmente hacia el oeste, concentrando sus precipitaciones en las zonas más altas de la cordillera. Por lo mismo, es de esperar que la localidad de Baquedano, ubicada 70 km al sur occidente de Sierra Gorda, se vea menos afectada por este fenómeno que la localidad de Sierra Gorda.

FIGURA N° 3-13 Tipos de climas de la Región de Antofagasta y de la comuna de Sierra Gorda



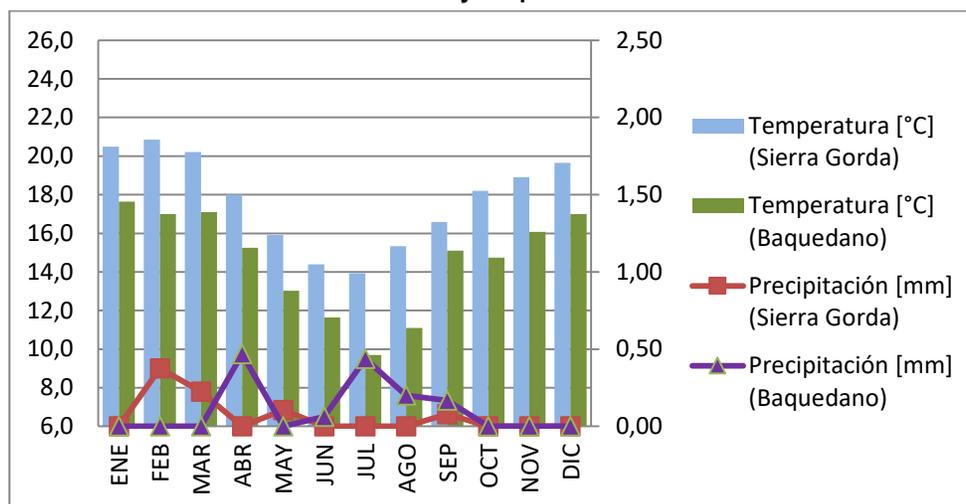
Fuente: elaboración propia, basado en Chester (2008)

FIGURA N° 3-14 Isoyetas y evapotranspiración potencial de la Región de Antofagasta



Fuente: Elaboración propia a partir de la DGA (1987)

FIGURA N° 3-15 Temperaturas y precipitaciones medias mensuales para las localidades de Sierra Gorda y Baquedano



Fuente: elaboración propia, con base en la DGA y GAC (2007)

CUADRO N° 3-3 Tabla resumen de las temperaturas y precipitaciones medias de las localidades de Sierra Gorda y Baquedano, con los respectivos años de medición y fuente

LOCALIDAD	MEDICIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	AÑO	Fuente
Sierra Gorda	[°C]	20.5	20.9	20.2	18.0	15.9	14.4	13.9	15.3	16.6	18.2	18.9	19.7	1995-2013	DGA
Sierra Gorda	[mm]	0.00	0.38	0.23	0.00	0.11	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	1995-2014	DGA
Baquedano	[°C]	17.6	17.0	17.1	15.3	13.0	11.7	9.7	11.1	15.1	14.7	16.1	17	2000-2005	GAC (2007)
Baquedano	[mm]	0.00	0.00	0.00	0.47	0.00	0.06	0.44	0.20	0.17	0.00	0.00	0	1999-2014	DGA

Fuente: elaboración propia, con base en la DGA y GAC (2007)

3.5 Marco Hidrológico

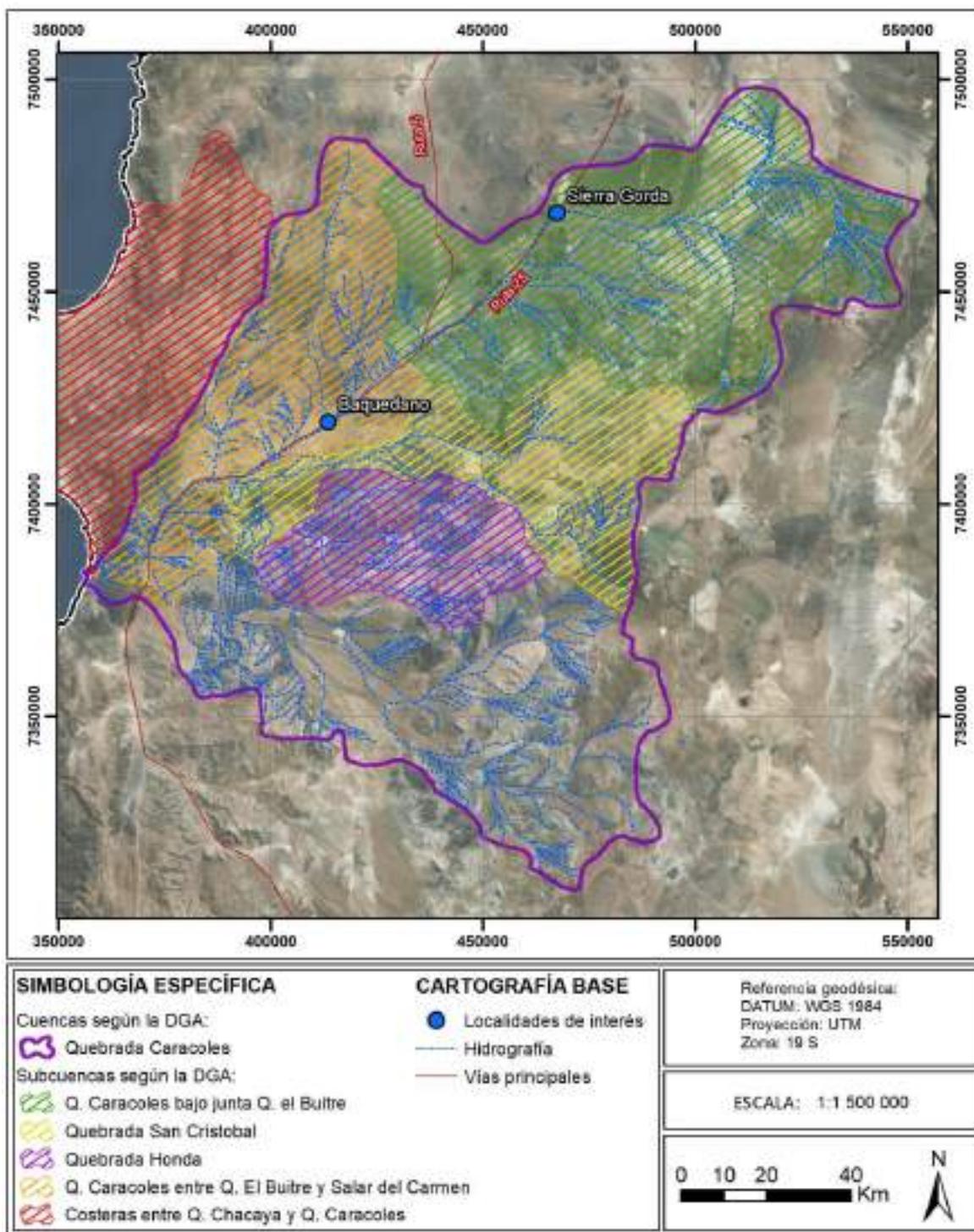
El drenaje de la Región de Antofagasta está compuesto por 3 tipos de cuencas: *exorreicas de tipo andinas o preandinas*, que corresponden a las cuencas del río Loa, por el norte, y a la quebrada de Tal Tal, por el sur; *endorreicas cerradas de alta puna o intermontanas*, ubicadas en el borde oriental de la región, y en las cuales se desarrollan la mayor parte de los salares; y cuencas *arreicas de tipo preandinas y costeras*, en todo el borde costero y la zona centro de la región.

Las localidades de Sierra Gorda y Baquedano, según la codificación de la DGA (1987), se ubican dentro de la cuenca "Quebrada Caracoles", la cual drena un área aproximada de 18295 km². Esta cuenca es de tipo *arreica preandina*, lo que quiere decir que posee un sistema hídrico cuyo escurrimiento superficial es muy esporádico, ya que el agua infiltra o se evapora debido a la baja recurrencia de eventos pluviométricos y las altas tasas de evapotranspiración.

En particular, las sub cuencas donde se ubican las áreas de estudio, corresponden a las cuencas "Quebrada Caracoles entre Quebrada el Buitre y Salar del Carmen", de 3370 km², y "Quebrada Caracoles bajo junta Quebrada el Buitre", de 5693 km² (FIGURA N° 3-16).

Se observa que en ambas sub cuencas los lechos son de tipo consecuentes, lo que quiere decir que escurren siguiendo las pendientes naturales. Cabe destacar el hecho de que la superficie se encuentra surcada por una extensa red de drenes secos.

FIGURA N° 3-16 Principales cuencas de la comuna de Sierra Gorda



Fuente: Elaboración propia, con base en Cuencas DGA y red hídrica cartografía IGM

4 INVENTARIO DE PELIGROS GEOLÓGICOS

Con base en la revisión bibliográfica, el análisis de imágenes satelitales y la información recopilada en terreno, se realizó un inventario de peligros geológicos (FIGURA N° 4-1 y FIGURA N° 4-2) para cada uno de los peligros reconocidos en el área de estudio y en los alrededores.

Las fuentes utilizadas para la elaboración de los inventarios para los distintos peligros analizados son Urrutia y Lanza (1993), archivos de prensa y publicaciones científicas.

4.1 Sismos

4.1.1 Antecedentes Históricos

La costa oeste de Sudamérica está delineada por el borde occidental de la placa tectónica Sudamericana y se caracteriza por su sismicidad debido a la convergencia entre esta placa y la placa tectónica de Nazca. Esta convergencia de placas se caracteriza por un nivel particularmente alto de acoplamiento mecánico en la zona de contacto entre las placas, lo que permite la acumulación de grandes niveles de energía. Cuando la energía acumulada supera la resistencia mecánica en la zona de contacto entre las placas, se generan sismos de gran magnitud. Por lo anterior, la zona de convergencia define una banda sísmica activa angosta, de aproximadamente 150 a 200 kilómetros de ancho, y una profundidad variable que aumenta hacia el este, entre aproximadamente 5 km de profundidad en la fosa Perú-Chile y aproximadamente 150 km de profundidad bajo el cordón montañoso de Los Andes. En la zona de estudio, el contacto entre ambas placas se extiende hasta alrededor de los 40 - 53 km de profundidad (Tichelaar & Ruff (1993), Suárez y Comte (1993), Belmonte-Pool (1997), Khazaradze & Klotz (2003), Tassara et al., (2006)).

La costa de Chile históricamente ha sido afectada por grandes terremotos, varios acompañados de maremotos destructivos. En la FIGURA N° 4-1, se grafican los más importantes sismos de subducción que han afectado al territorio de Chile continental en el período histórico.

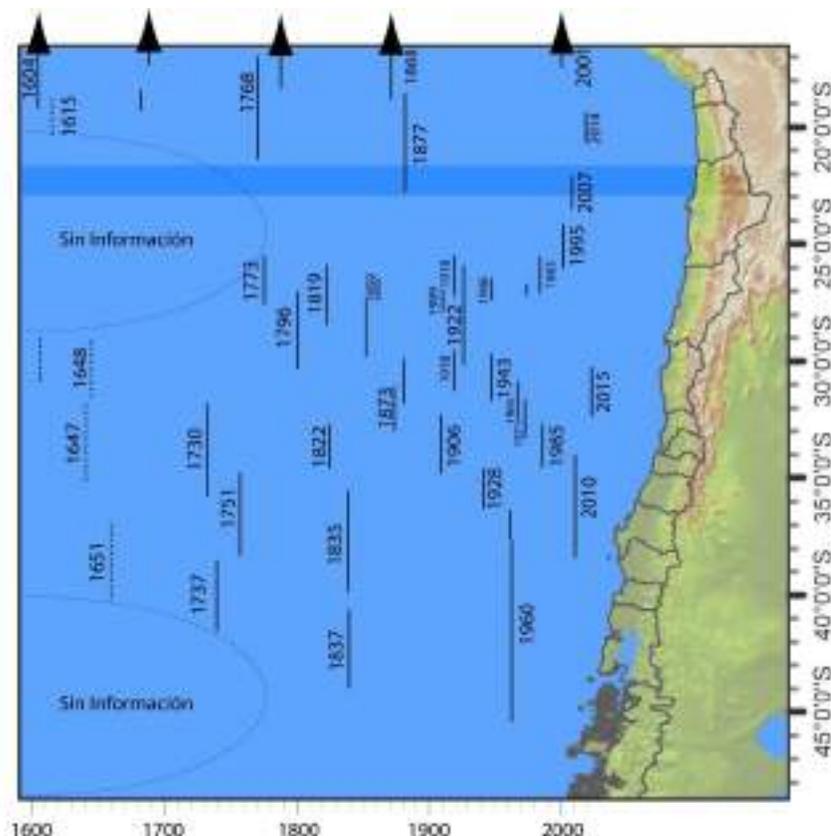
El área norte de Chile, entre Arica y la península de Mejillones posee antecedentes históricos de grandes terremotos interplaca tipo thrust (por ejemplo, los terremotos de 1877, 2007) tal como se observa en la FIGURA N° 4-1. Los principales eventos que han afectado al área de estudio se presentan en el CUADRO N° 4-1, donde destaca el terremoto de 2007, al que se calculó una magnitud de $M_W=7.7$. Solo un sismo de magnitud superior a 7.0 ha ocurrido en la comuna de Sierra Gorda, a 100 km de profundidad

CUADRO N° 4-1 Registro histórico de los más grandes sismos interplaca ocurridos en la zona de estudio

FECHA	DESCRIPCIÓN
24 de noviembre de 1604	Terremoto en Arica (Ms=8,5), generó maremoto. La zona de Sierra Gorda se encontraba despoblada en esa época, no hay registros.
16 de diciembre de 1615	Terremoto en Arica (Ms=8,8) generó maremoto. La zona de Sierra Gorda se encontraba despoblada en esa época, no hay registros.
10 de marzo de 1681	Terremoto en Arica (Ms=7,3). La zona de Sierra Gorda se encontraba despoblada en esa época, no hay registros.
8 de octubre de 1831	Terremoto en Arica (Ms=7,8). La zona de Sierra Gorda se encontraba despoblada en esa época, no hay registros.
18 de septiembre de 1833	Terremoto en Arica (Ms=7,7). La zona de Sierra Gorda se encontraba despoblada en esa época, no hay registros.
13 de agosto de 1868	Terremoto desde Ica, Perú, hasta Tarapacá, Chile (Mw=9,0) que generó un maremoto. La zona de Sierra Gorda se encontraba despoblada en esa época. Sin embargo, el sismo se sintió fuerte en ese sector (V Mercalli).
9 de mayo de 1877	Terremoto desde Arica hasta Copiapó (Ms=8,5), que produjo un maremoto hasta Chiloé, y en las costas de Japón y Nueva Zelanda. En Sierra Gorda, la intensidad fue de VII/VIII (Mercalli).
25 de agosto de 1916	Sismo en Antofagasta. El movimiento telúrico provocó quebrazón de vidrios y botellas en los negocios de Tocopilla. En Gatico hubo un muerto y cuatro heridos.
19 de octubre de 1929	Terremoto en Sierra Gorda (Ms=7,5). El epicentro fue en la comuna de Sierra Gorda (cerca de la localidad de Sierra Gorda). Cuatro muertos y varios heridos quedaron en Antofagasta, Pampa Unión y Calama.
20 de diciembre de 1967	Terremoto en Tocopilla (Ms=7,5). En esa comuna, hubo un muerto y dos heridos graves, un 80% de las viviendas quedaron con daños y un 20% inhabitables.
30 de julio de 1995	Terremoto en Antofagasta (Mw=8,0). Fue registrado entre Arica (4M) y La Serena (IV M). Se sintió en Perú, Bolivia y Argentina. El tsunami generado no causó grandes destrozos en Antofagasta.
14 de noviembre de 2007	Terremoto en Tocopilla (Mw=7,7). Las localidades de Sierra Gorda y Baquedano fueron afectadas, con intensidades de V y VI (escala de Mercalli), respectivamente. Daños: 15 mil personas damnificadas y dos muertos.
1 de abril de 2014	Terremoto en Iquique (Mw=8,2). Afectó a todo el Norte Grande (regiones Arica-Parinacota, Tarapacá y Antofagasta). En la comuna de Sierra Gorda, la intensidad en escala de Mercalli fue de IV.

Fuente: Elaboración propia con base en Urrutia y Lanza (1993), Madariaga (1998) y las agencias GUC y NEIC.

FIGURA N° 4-1 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



Fuente: Elaboración propia

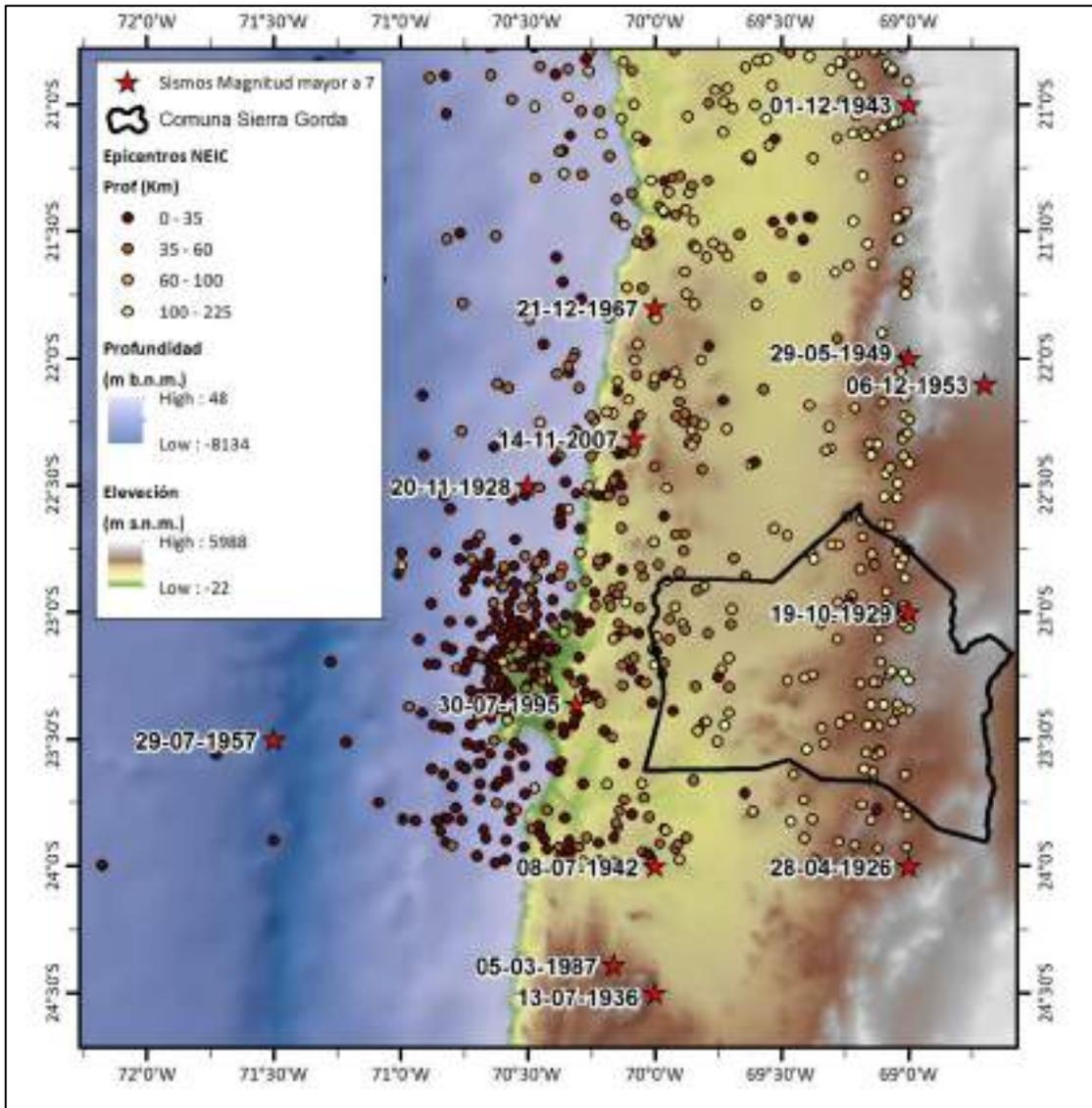
4.1.2 Sismos registrados por la red sismológica mundial.

En la FIGURA N° 4-2, se presenta la sismicidad registrada por la red sismológica internacional, con magnitudes superiores a 4.0.

En esta figura, se aprecia que una gran cantidad 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 manto). 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. En la 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.

En el área de estudio no se han registrado instrumentalmente sismos superficiales asociados a fallas corticales activas. A pesar de lo anterior, se reconoce que la comuna de Sierra Gorda está próxima al sistema de fallas de Atacama, que ha sido reconocida como activa (FIGURA N° 3-12).

FIGURA N° 4-2 Mapa regional con la sismicidad registrada instrumentalmente



Fuente: Elaboración propia en base a Catálogo NEIC (sismos sobre magnitud 4.0).

4.1.3 Principales fuentes sísmicas reconocidas en el área de estudio

En el área de estudio se reconocen tres fuentes sismogénicas principales: (1) interplaca tipo thrust, (2) intraplaca de profundidad intermedia y (3) eventos corticales (ver Anexo A.2.1).

4.1.3.1 Sismos Interplaca tipo Thrust

Corresponden a aquellos eventos que se producen en el contacto entre las placas de Nazca y Sudamericana (ver Anexo A.2.1), producto de los esfuerzos comprometidos en el proceso de la subducción. Este tipo de eventos alcanzan grandes magnitudes y son aquellos que poseen potencial de generar maremotos. Los sismos de este tipo que han afectado a la zona de estudio se resumen en el CUADRO N° 4-1.

4.1.3.2 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. (ver Anexo A.2.1).

La zona de estudio no ha sido afectada en períodos históricos por terremotos del tipo intraplaca de profundidad intermedia de magnitud importante. Sin embargo, en el norte de Chile han ocurrido terremotos intraplaca de profundidad intermedia de gran magnitud (Calama 1950, $M_S \approx 8$; Tarapacá 2005, $M_W = 7.5$), son del tipo del terremoto de Chillán de 1939, que ha sido el terremoto que más daño y mortandad ha generado en Chile. Por lo que esta fuente de sismicidad no debe ser desestimada.

Cabe destacar que no existen registros más detallados de la ocurrencia previa a 1950 de grandes sismos intraplaca de profundidad intermedia; esto es, en gran parte, debido a las limitaciones del registro instrumental e histórico.

4.1.3.3 Sismos Corticales

No existen registros de ocurrencia de este tipo de sismos en el área de estudio, pues no existen evidencias de fallas activas en la comuna de Sierra Gorda (FIGURA N° 3-12). Sin embargo, la existencia del sistema de falla de Atacama, de fallas consideradas como activas, en las cercanías no permite descartar la ocurrencia de este tipo de sismos y que tengan consecuencias en el área estudiada en el futuro.

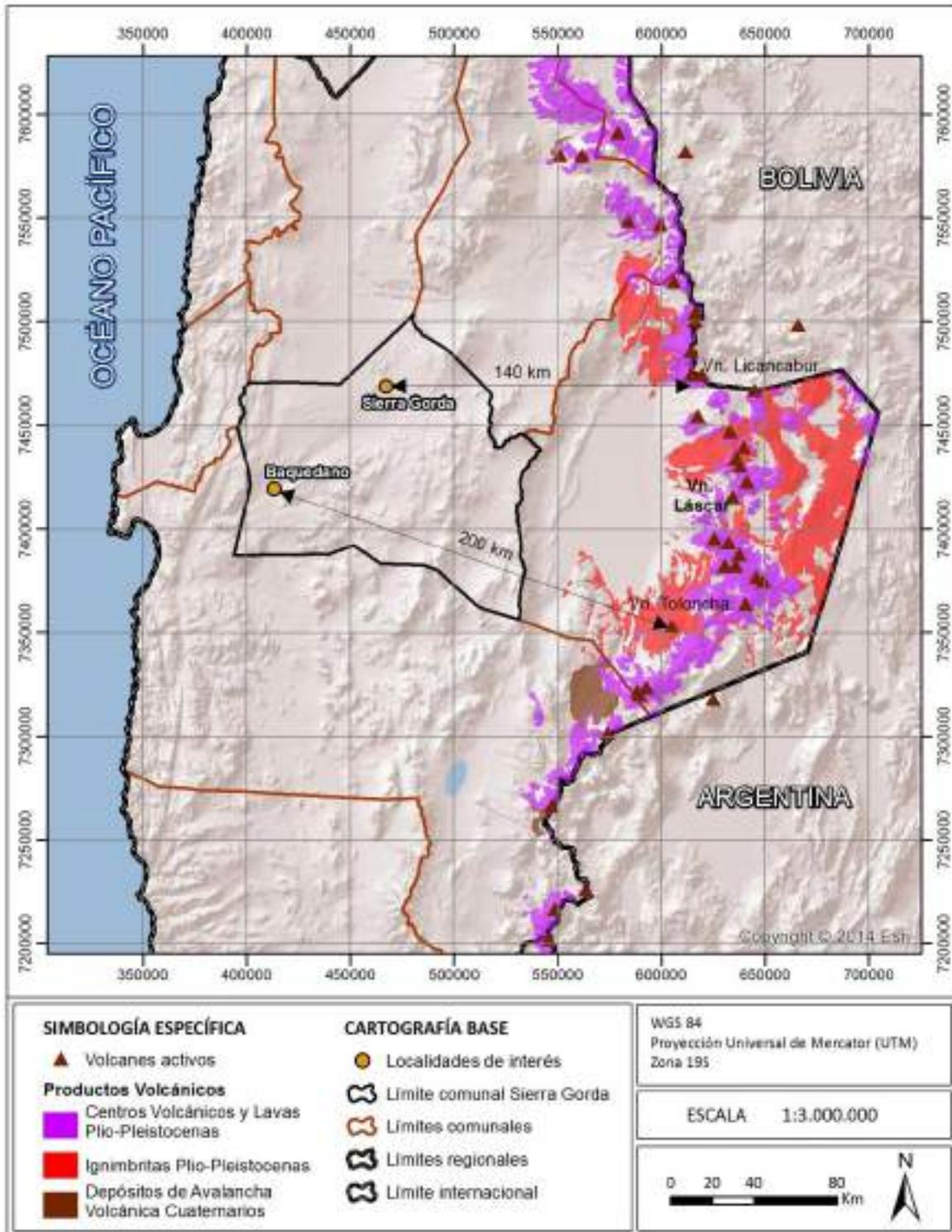
4.2 Centros volcánicos y evidencias de actividad volcánica

En la FIGURA N° 4-3, se muestran los centros volcánicos activos próximos a la comuna de Sierra Gorda. Los volcanes más cercanos a las localidades de Sierra Gorda y de Baquedano son el volcán Licancabur (a una distancia aproximada de 140 km de la localidad de Sierra Gorda) y el volcán Toloncha (a 200 km de la localidad de Baquedano) (FIGURA N° 4-3). Todos estos volcanes pertenecen al segmento denominado Zona Volcánica de los Andes Centrales, que se desarrolla entre los 14°S y 28°S. Esta zona volcánica se caracteriza por la relativa abundancia de productos volcánicos altamente diferenciados de composiciones riolítica y dacítica. Además, esta zona constituye una de las mayores provincias de ignimbritas del Terciario superior del mundo.

El centro volcánico más activo cercano a la comuna de Sierra Gorda es el volcán Láscar, que se encuentra a aproximadamente 175km de distancia de la localidad de Sierra Gorda y a 220 km de la localidad de Baquedano. El volcán Láscar se considera el más activo en tiempos históricos de los Andes del norte de Chile, con más de 15 eventos eruptivos y de diferentes magnitudes en el siglo XX. Corresponde a un macizo volcánico compuesto por dos estratovolcanes maclados cuyos centros de eyección se encuentran separados en 1,6 km en un rumbo N66E, sus cráteres alcanzan un diámetro de 900 metros cada uno (González-Ferrán, 1999). Posee un volumen estimado de 30 – 40 km³ y se considera que ha estado activo desde hace 230.000 años (Gardeweg, et al., 1998). El flujo de lava más reciente (que habría ocurrido en tiempos históricos) corresponde a una andesita basáltica que escurrió de este último alcanzando unos 5,5 km por la ladera nor-noroeste. Ha presentado abundante actividad histórica con eyección de fumarolas, cenizas, pómez, lavas y bloques de lava, erupciones freatomagmáticas y plinianas, y crecimiento de domos. Esta misma actividad se puede reconocer en el volcán Láscar en tiempo pre-Holocenos, asociada además a la generación de lahares, avalanchas de detritos y abanicos aluviales. En la actualidad todos estos procesos constituyen peligros potenciales asociados a este volcán, excepto la generación de lahares dadas las condiciones climáticas actuales (Gardeweg, et al., 1998).

La amplia distancia que separa la comuna de Sierra Gorda de los centros volcánicos aledaños ha favorecido que la comuna de Sierra Gorda no haya sido afectada por productos volcánicos desde, al menos, el Plioceno (FIGURA N° 4-3).

FIGURA N° 4-3 Ubicación de los centros volcánicos próximos a la comuna de Sierra Gorda



Fuente:

Fuente: Elaboración propia a partir de SERNAGEOMIN (2003).

4.3 Procesos de remoción en masa

El CUADRO N° 4-2 presenta un catastro con las remociones en masa identificadas correspondientes a eventos que han ocurrido en la comuna de Sierra Gorda y en los alrededores de ella.

La mayoría de los eventos reconocidos corresponden a aluviones provocados por lluvias de larga duración y que pueden afectar a una gran superficie, y/o por lluvias caracterizadas por una alta intensidad en un breve período y en una zona acotada, que corresponden a lluvias de tipo convectivas.

El 11 de febrero de 2011, ocurrió un extenso aluvión en gran parte de la comuna de Sierra Gorda gatillado por fuertes precipitaciones que habrían durado aproximadamente 40 minutos. El aluvión abarcó entre el kilómetro 53 al 80 de la Ruta-25, cubriendo el camino con varios centímetros de lodo y piedras, e incluso, en algunos sectores de la ruta, el agua alcanzó los 1,5 metros de altura. (FIGURA N° 4-4). Cinco vehículos quedaron atrapados por este aluvión. Afortunadamente, no se presentaron daños mayores; no obstante, la oportuna reacción de la Municipalidad de Sierra Gorda impidió que la situación se complicara, debido a que la mayoría de las viviendas no está preparada para resistir estos frentes de mal tiempo.

FIGURA N° 4-4 Un torrente de barro cortando la Ruta 25 de la comuna de Sierra Gorda



Fuente: Municipalidad de Sierra Gorda.

CUADRO N° 4-2 Catastro de remociones en masa recopilado a partir de referencias bibliográficas

FECHA	DESCRIPCIÓN
9 de mayo de 1877	Derrumbes de cerros en Tocopilla producto del terremoto y maremoto ocurrido ese día. Los derrumbes cubrieron el camino que atravesaba la cordillera de la costa y abrieron pequeñas grietas en la tierra (Urrutia & Lanza, 1993).
18 de mayo de 1912	Un fuerte temporal generó un aluvión en el sector de Toldos, destruyó el campamento de Gatico (Urrutia & Lanza, 1993), ubicado a unos 100 km al noroeste de la actual localidad de Sierra Gorda.
24 y 25 de julio de 1940	Un frente de mal tiempo afectó considerablemente distintos sectores de la ciudad de Tocopilla. No se registran daños en el entonces poblado de Sierra Gorda. De acuerdo a Vargas et al. (2000), ese mismo día ocurrieron precipitaciones en Antofagasta, lo que lleva a descartar la hipótesis que dice que la totalidad de las lluvias son de tipo convectivas.
Mayo de 1982	A fines de Mayo en la II Región, principalmente Antofagasta, Calama, Chuquicamata y numerosos poblados del interior fueron afectados por intensas lluvias con vientos incluso nevazones. Aludes de barro y piedras provocaron la caída de árboles, postes de alumbrados públicos y telefónicos (Urrutia & Lanza, 1993).
Julio de 1983	En los primeros días de julio, el mal tiempo con lluvia y nieve ocasionó daños en la comuna de Sierra Gorda; Este temporal también afectó a Iquique, Antofagasta, Ollagüe, Taltal, Calama, Chuquicamata y en el valle de Elqui (Urrutia & Lanza, 1993).
17-18 de junio de 1991	Fuentes temporales afectaron desde la II a la IV Región. El problema más grave se produjo en Antofagasta: las desacostumbradas precipitaciones originaron un violento aluvión; el alud de agua y lodo se desplazó a razón de 30 km/h cubriendo todo el sector norte de la ciudad (inmediatamente al sur de la comuna de Sierra Gorda) (Urrutia & Lanza, 1993). El aluvión bajó por todas las quebradas, pero las más notables por el daño fueron las de La Cadena, Salar del Carmen, Baquedano y El Ancla (Diario El Mercurio de Calama, 18/06/2007)
2-4 de julio de 2002	Daños materiales. 200 damnificados trasladados a albergues. Causados por una lluvia de 11,5 mm de más de 24 horas de duración. (Diario El Mercurio de Antofagasta, 05/07/2002). En relación al alcance geográfico de la emergencia se incluye la comuna de Sierra Gorda dentro de los territorios afectados, no obstante los daños y damnificados se concentran en la comunas de Antofagasta y Tocopilla (ONEMI, 2002)
11 de febrero de 2011	Se registraron fuertes precipitaciones durante casi 40 minutos en la comuna de Sierra Gorda. Producto de la acumulación de agua por las precipitaciones, una matriz de Aguas Antofagasta se rompió, provocando un aluvión de barro y piedras que cortó la ruta que une Sierra Gorda con Calama, entre el Kilómetro 53 al 80 de la Ruta-25 (a la altura de Minera Spence) (Diario El Mercurio de Antofagasta, 11/02/2011). El aluvión generado dejó serios daños y damnificados en la comuna de Sierra Gorda.

FECHA	DESCRIPCIÓN
25 de agosto de 2013	Sistema frontal que causó precipitaciones en la Región de Antofagasta (La Estrella de Tocopilla, 2013). Se declara alerta amarilla para las Provincias de El Loa y Tocopilla, la que es levantada el 26 de Agosto sin reporte de daños para la comuna de Sierra Gorda ((ONEMI, 2013), información histórica de Alertas), I
24 al 26 de marzo de 2015	En la localidad de Sierra Gorda, se generaron flujos de barro de baja energía producto de las lluvias torrenciales que afectaron a las regiones de Antofagasta, Atacama y Coquimbo (SERNAGEOMIN, 2015). En Sierra Gorda, se produjeron cortes de temporales de carreteras, vía férrea y anegamientos menores del margen occidental del poblado, lo que dejó 10 familias damnificadas que recibieron daño mayor, mientras que en Baquedano, se inundó totalmente la calle principal, sin embargo, no hubo personas afectadas directamente (SERNAGEOMIN, 2015; El Mercurio de Antofagasta, 2015; El Nortero, 2015).

Fuente: Elaboración propia.

4.4 Inundaciones terrestres (desbordes de cauces y anegamientos)

En las fuentes bibliográficas consultadas, no se hace mención de inundaciones por desborde de cauces o anegamientos que hubieran ocurrido directamente en las localidades de Sierra Gorda o Baquedano. Sin embargo, al norte de Sierra Gorda, en las cercanías de la Minera Spence, las precipitaciones del 11 de febrero del 2011 provocaron la rotura de una matriz de Aguas Antofagasta, lo que a su vez generó un aluvión de barro y piedras, el cual anegó la Ruta-25 (FIGURA N° 4-4). Si bien se trata de un accidente producto de una falla de infraestructura, queda en evidencia que la canalización de grandes volúmenes de agua sí puede provocar anegamientos. Adicionalmente, durante la campaña de terreno, se reconocieron sectores con bajos topográficos que, ante un temporal, también podrían ser propensos a la ocurrencia de anegamiento muy localmente. Considerando lo anterior, en el CUADRO N° 4-3 se detallan los temporales que han afectado a la comuna de Sierra Gorda desde 1980.

CUADRO N° 4-3 Catastro de temporales que han afectado a la comuna de Sierra Gorda

FECHA	DESCRIPCIÓN
Mayo de 1982	A fines de Mayo en la II Región, principalmente Antofagasta, Calama, Chuquicamata y numerosos poblados del interior fueron afectados por intensas lluvias con vientos incluso nevazones. Aludes de barro y piedras provocaron la caída de árboles, postes de alumbrados públicos y telefónicos (Urrutia & Lanza, 1993).
Junio de 1983	Durante junio un temporal de viento, lluvia y nieve azotó a Chuquicamata, Calama y pequeñas localidades de la II Región, quedando cuatro mil damnificados. En los primeros días de julio, el mal tiempo con lluvia y nieve ocasionó daños en la comuna de Sierra Gorda y varias ciudades del norte (Urrutia & Lanza, 1993).
17-18 de junio de 1991	Fuertes temporales afectaron desde la II a la IV Región (Urrutia & Lanza, 1993).
2-4 de julio de 2002	Daños materiales. 200 damnificados trasladados a albergues. Causados por una lluvia de 11,5 mm de más de 24 horas de duración. (Diario El Mercurio de Antofagasta, 05/07/2002).
11 de febrero de 2011	Se registraron fuertes precipitaciones durante casi 40 minutos en la comuna de Sierra Gorda.
25 de agosto de 2013	Sistema frontal que causó precipitaciones en la Región de Antofagasta (La Estrella de Tocopilla, 2013).
24-26 de marzo de 2015	Sistema frontal que genera lluvias torrenciales afectó a las regiones de Antofagasta, Atacama y Coquimbo. De acuerdo al registro de la Dirección General de Aguas, durante este evento llovieron 11,8 mm en Calama, 33,3 mm en Antofagasta, 85,5 mm en Aguas Verdes y 4,4 mm en Quillagua.

Fuente: Elaboración propia.

5 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: 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: casos en los que se puede categorizar la susceptibilidad y por lo tanto determinar una zonificación de la misma.

Para la zonificación de peligros geológicos se consideró toda la información recopilada en el presente trabajo, como son los antecedentes históricos, información recopilada en terreno, análisis de imágenes satelitales, línea base geológica y geomorfológica y los factores condicionantes en la zona de estudio.

La metodología específica utilizada para el análisis de cada peligro geológico se describe en la Sección 2.6 "Diagnóstico de Susceptibilidad".

5.1 Peligros No Zonificables

5.1.1 Peligro Sísmico

El riesgo sísmico está sujeto a la dinámica tectónica del país y a su contexto regional. Considerando lo discutido anteriormente, se puede concluir que el área de estudio ha sido afectada por sismos importantes, al igual que casi todo Chile y conociendo que estos fenómenos son recurrentes y propios de la dinámica de subducción en que se encuentra Chile, no debe descartarse la ocurrencia de este tipo de fenómenos 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.

5.1.2 Peligro Volcánico

El centro volcánico más activo cercano a la comuna de Sierra Gorda es el volcán Láscar, que se encuentra a aproximadamente 175km de distancia de la localidad de Sierra Gorda y a 220 km de la localidad de Baquedano. Las amplias distancias que separa los sectores de interés del volcán Láscar y, considerando la ausencia de productos volcánicos desde al menos el Plioceno en la comuna de Sierra Gorda, sugieren que el peligro volcánico no sería una amenaza directa en la zona y no se ha considerado para la

zonificación. Sin embargo, erupciones fuera del área de estudio podrían causar efectos indirectos sobre el área, como contaminación de aguas y problemas de transporte o abastecimiento.

5.2 Peligros Zonificables

5.2.1 Peligro de Inundaciones, Anegamientos y Flujos de Detritos y/o Barro

Según lo expuesto en la sección 3.5 “*Marco Hidrológico*”, las cuencas en las que se ubican las localidades de Sierra Gorda y Baquedano son de tipo *arreica preandina*, lo que quiere decir que poseen un sistema hídrico cuyo escurrimiento superficial es muy esporádico, ya que el agua infiltra o se evapora debido a la baja recurrencia de eventos pluviométricos y las altas tasas de evapotranspiración.

Sin embargo, tal como se indica en la Sección 4.4 “*Inundaciones terrestres (desbordes de cauces y anegamientos)*”, existe registro de algunos eventos de precipitaciones extremas en la zona. Uno de ellos ocurrió durante el 11 de febrero de 2011, el cual provocó anegamientos al norte de la localidad de Sierra Gorda, en las cercanías de la Minera Spence (FIGURA N° 4-4). Otro evento de precipitaciones importante ocurrió durante marzo de 2015, que produjo flujos de barro en varias localidades ubicadas cerca de la comuna, en particular en Sierra Gorda, donde se produjo un flujo de barro de baja energía (SERNAGEOMIN, 2015). Adicionalmente, las observaciones de terreno indican que los bajos topográficos también han experimentado anegamientos, los cuales quedan de manifiesto por los sedimentos finos depositados en ellos, así como en las grietas de desecación superficiales (FIGURA N° 5-1).

FIGURA N° 5-1 Acumulación de sedimentos finos y desarrollo de grietas de desecación producto del anegamiento en bajos topográficos, Sierra Gorda.



Fuente: Archivo fotográfico de terreno.

Lo anterior sugiere que, si bien las precipitaciones son muy esporádicas y las aguas lluvias tienden a infiltrar y/o evaporar, los anegamientos y flujos de detritos y/o barro sí son parte del registro, tanto histórico como geológico, y por tanto la zona de estudio requiere de zonificación de esta susceptibilidad.

El origen de los flujos superficiales que pueden alcanzar las áreas de estudio de detalle (considerando flujos con mayor o menor proporción de material sólido), está restringido a los abanicos aluviales aportantes de cada una de las dos localidades. En este sentido, la zonificación de inundaciones terrestres (es decir, el escurrimiento superficial de agua prácticamente sin material sólido) se consideró equivalente a la zonificación de flujos de detrito y/o barro. Para establecer las zonas que pueden ser afectadas por este tipo de fenómeno, se procedió a analizar el área según dos escalas distintas:

Delimitación de abanicos aluviales aportantes (presentada a escala 1:50.000, como figuras dentro del texto): a partir de indicadores geomorfológicos, se reconocieron los abanicos aluviales que presentan una mayor cantidad de indicadores de que estos han canalizado flujos de detritos en el pasado más reciente, y que han depositado su material tanto en las áreas de estudio de detalle como en los alrededores inmediatos de las mismas. El propósito de esta delimitación consiste en establecer preliminarmente las macro zonas desde las cuales se espera que provengan los flujos en el futuro.

Estas unidades geomorfológicas se clasificaron según dos tipos: aquellos abanicos en los cuales se han canalizado *los últimos flujos de detritos y/o barro* (es decir, con actividad más reciente), y aquellos abanicos que albergan *flujos anteriores* a estos (es decir, con actividad más antigua). En este sentido, se esperaría que sean los abanicos con actividad más reciente los que tiendan a recolectar las aguas que se generen por eventos meteorológicos extremos. Para el caso particular de Baquedano, también se reconoció la unidad de la “Quebrada principal”, que recibe y canaliza el agua proveniente de las quebradas menores.

Según esta delimitación, se observa que prácticamente la totalidad del área de detalle de Sierra Gorda se encuentra ubicada sobre un abanico aluvial con actividad reciente. Debido a la dinámica propia de los abanicos aluviales activos, los cauces esporádicos superficiales muestran una deriva lateral. Además, estos canales pueden verse colmatados, lo que eventualmente podría inundar los interfluvios del propio abanico. Esta característica fue tomada en consideración para determinar la zonificación, cuyos criterios se presenta a continuación.

- **Zonificación de susceptibilidad** (presentada a escala 1:5.000, como planos fuera de texto): se identificaron las zonas que pueden ser afectadas por inundaciones y flujos de detritos y/o barro, estableciendo las categorías de “Alta” y “Moderada” susceptibilidad. Adicionalmente, se determinaron las zonas que pueden experimentar anegamientos, debido a las condiciones topográficas del terreno. A continuación se describen los criterios utilizados para establecer cada una de ellas.
 - o Zonas de Alta Susceptibilidad: debido a que no existen cauces fluviales naturales permanentes, sino solo esporádicos, se identificaron en esta categoría los cauces que muestran la canalización de los últimos flujos de detritos y/o barro que han alcanzado las áreas de estudio de detalle o sus alrededores inmediatos. En caso de eventos

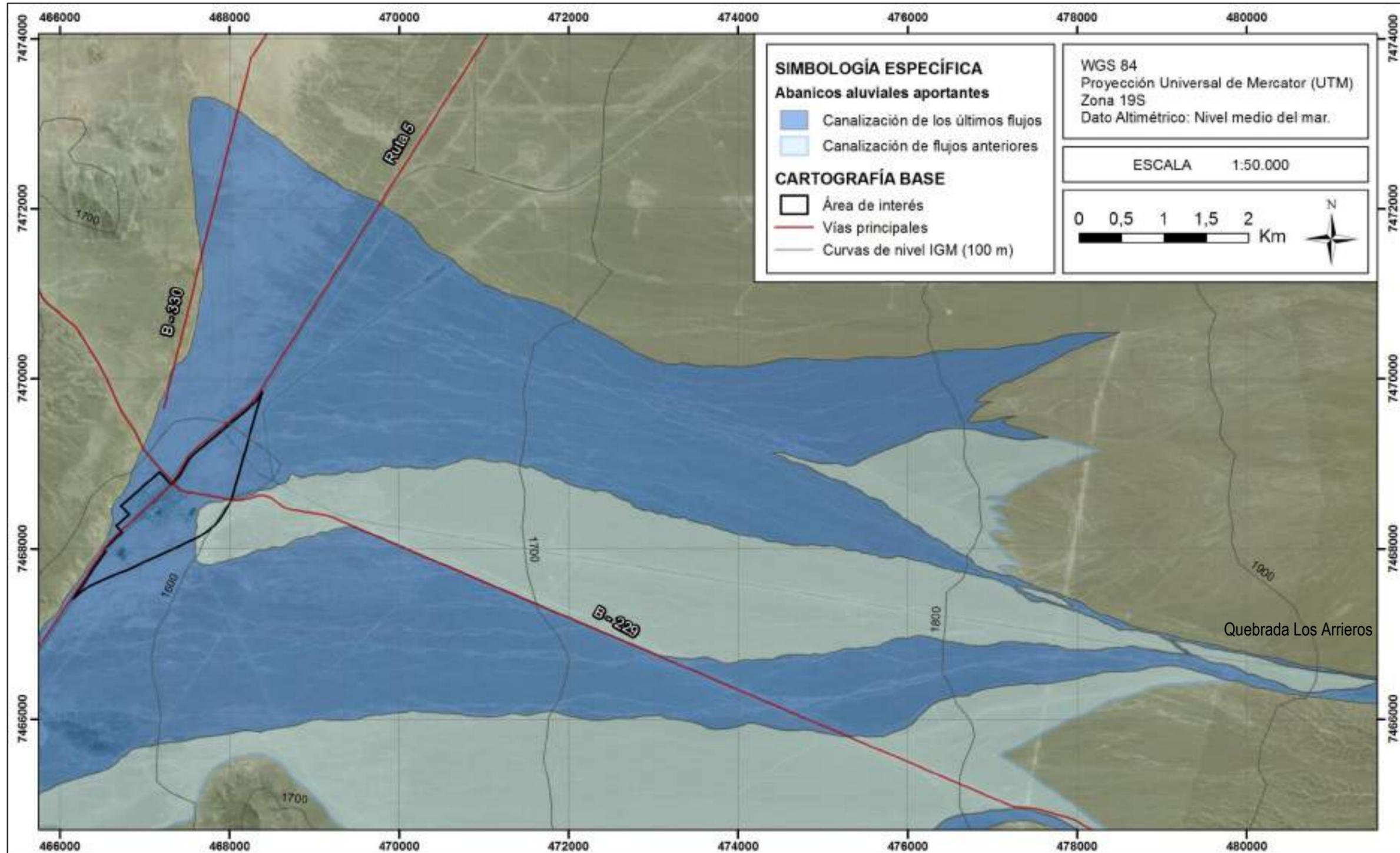
meteorológicos extremos, se espera que sean estas zonas las que recolecten posibles flujos superficiales (con mayor o menor proporción de material sólido).

- Zonas de Moderada Susceptibilidad: corresponde a superficies que, estando ubicadas sobre el abanico aluvial activo, no muestran la canalización de los últimos flujos de detrito y/o barro. Suelen formar parte de los interfluvios de los cauces agrupados en las zonas de “Alta Susceptibilidad”. Las zonas de “Moderada Susceptibilidad” tenderán a canalizar flujos solo en el caso de que las zonas de “Alta Susceptibilidad” se colmaten, y por ende derramen el material sobre estas. Para el caso de la localidad de Baquedano, en la zona de la “Quebrada principal”, los cauces con actividad más reciente también se consideraron en esta categoría, ya que su actividad está condicionada por la actividad de la quebrada, la cual se considera de menor grado.
- Zonas de Anegamientos: están constituidas por los bajos topográficos que muestran conexión con algún cauce natural activo en el pasado. Además de la topografía, se reconocen por la presencia de sedimentos finos (que dan un color café claro en las imágenes satelitales), y por las grietas de desecación observadas en terreno. En general, las zonas expuestas a anegamiento son el resultado de la actividad antrópica, como extracción de material o la construcción de terraplenes para la urbanización.

En la FIGURA N° 5-2 se presenta la zonificación de abanicos aluviales aportantes de la localidad de Sierra Gorda. En ella se observa que los abanicos que han canalizado los últimos flujos, y que han afectado la localidad de Sierra Gorda en el pasado geológico, provienen principalmente de la Quebrada Los Arrieros. Los flujos que emergen de esta quebrada se dividen en dos brazos, tal como se muestra en el recuadro “A” de la FIGURA N° 5-3. Por otra parte, los recuadros “B” y “C” de la misma figura muestran que existen zonas de anegamiento aguas arriba del camino, evidenciadas por los colores café claro de la imagen satelital, que se asocian a la alteración en el escurrimiento generada por el mismo camino, lo que sugiere que ambas ramas del abanico han canalizado eventos de flujos superficiales posteriores a la construcción del mismo. La zonificación de susceptibilidad a nivel local de Sierra Gorda, se presenta en el PLANO N°1, fuera de texto.

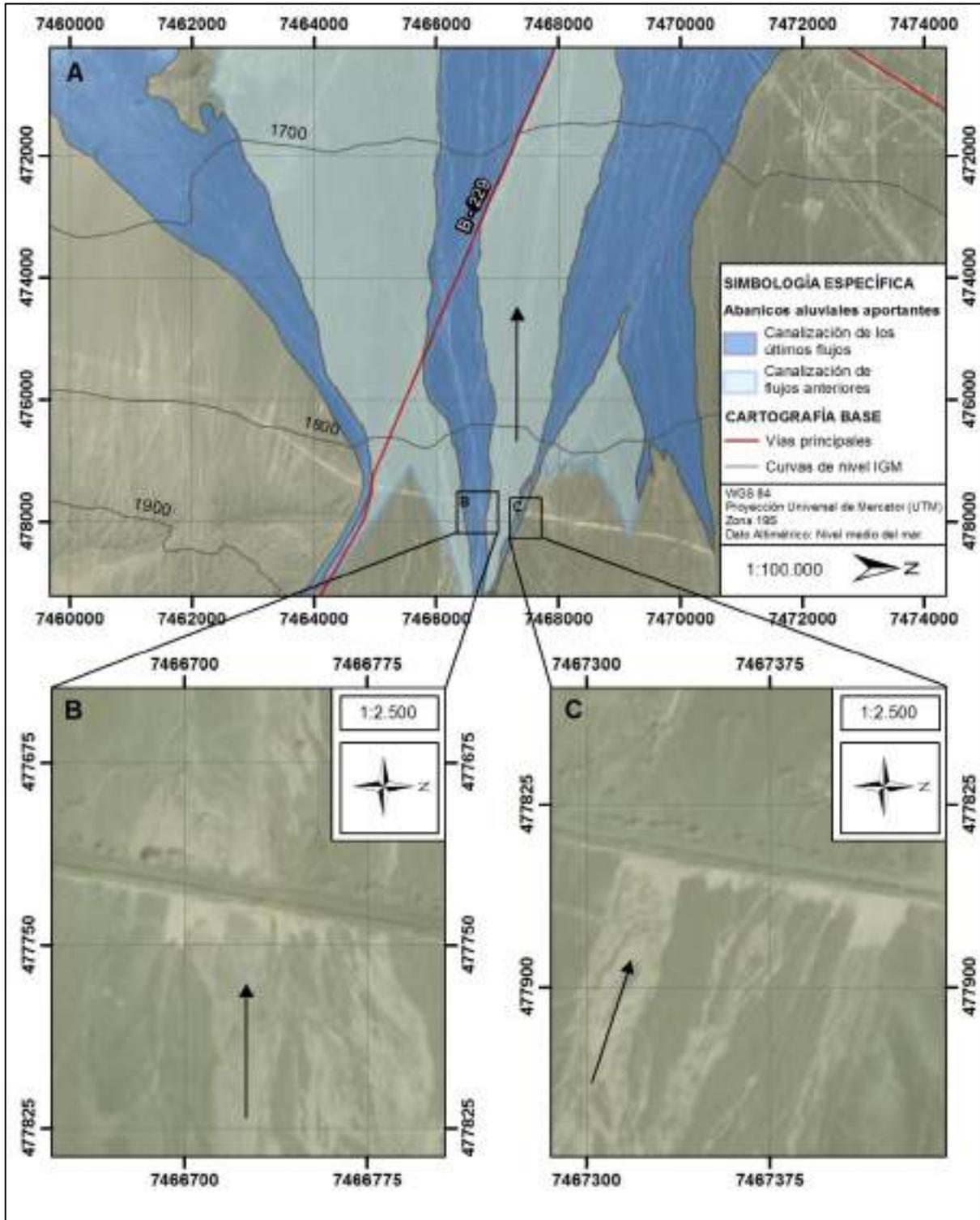
Por su parte, en la FIGURA N° 5-4 se muestra la zonificación de abanicos aluviales aportantes de la localidad de Baquedano. La quebrada de mayor relevancia para el área de estudio de detalle corresponde a la quebrada de la Ruta B – 385, desde la cual provienen los últimos flujos superficiales que se han canalizado en el pasado geológico y reciente. Adicionalmente, la “Quebrada principal” fue distinguida como una unidad aparte, ya que su actividad está condicionada por el largo trayecto que la separa de sus propias cuencas aportantes. Esto implica que, en caso de un evento meteorológico extremo, la quebrada sería menos susceptible de canalizar flujos, ya que estos tienen más chance de infiltrarse o evaporar. Por lo mismo, la susceptibilidad de flujos sobre esta unidad fue ajustada y considerada menor que las zonas ubicadas sobre los abanicos aluviales aportantes. La zonificación de susceptibilidad a nivel local de Baquedano se presenta en el PLANO N°2, fuera de texto.

FIGURA N° 5-2 Zonificación de abanicos aluviales aportantes en el área de detalle de Sierra Gorda.



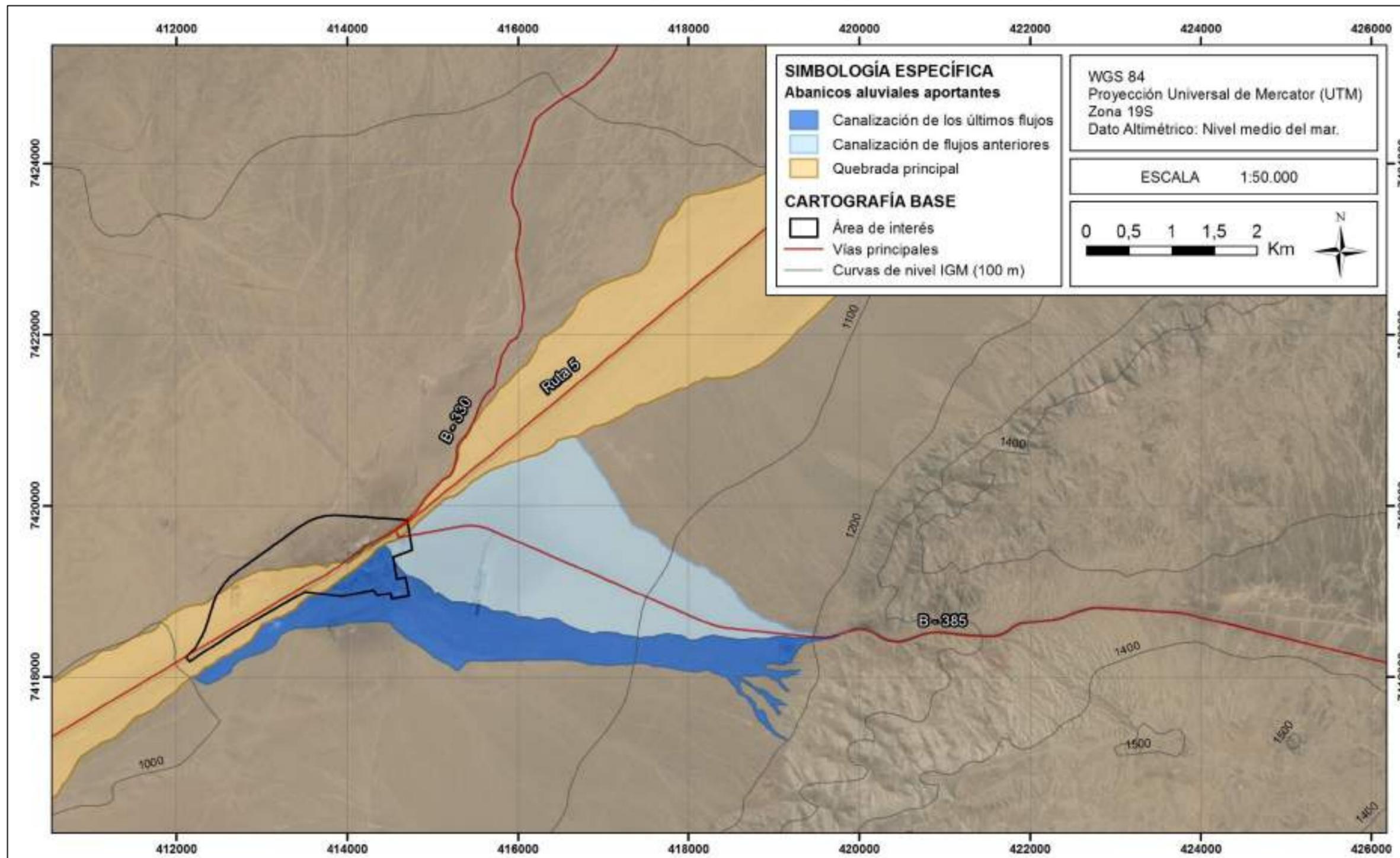
Fuente: Elaboración propia

FIGURA N° 5-3 Evidencias geomorfológicas de la ocurrencia de flujos históricos. Con flechas negras se indican las direcciones de flujo (E-W aprox).



Fuente: Elaboración propia

FIGURA N° 5-4 Zonificación de abanicos aluviales aportantes y la quebrada principal, en el área de detalle de Baquedano



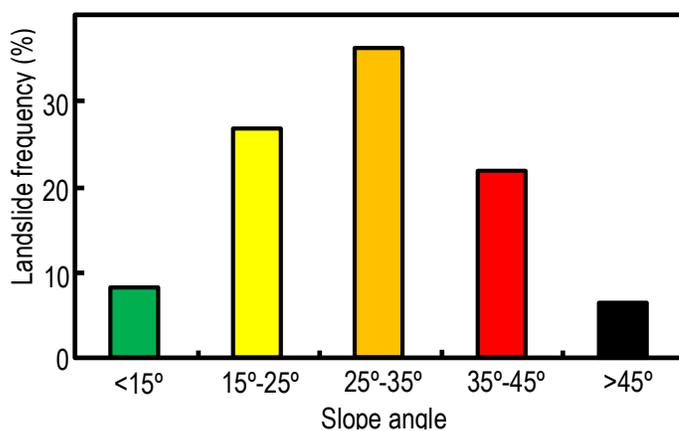
Fuente: Elaboración propia

5.2.2 Peligro de Remociones en Masa

Para la zonificación de los sectores susceptibles de ser afectados por remociones en masa, se consideró la información recopilada en la línea de base geológica y geomorfológica, en el inventario de peligros geológicos y durante la visita a terreno.

Uno de los principales factores que determina la generación de remociones en masa es la pendiente de las laderas. Para diferenciar qué 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 (ver FIGURA N° 5-5), siendo también frecuentes entre los 15° y 25° y sobre los 35°.

FIGURA N° 5-5 Frecuencia de deslizamientos en función de la pendiente del terreno



Fuente: Esaki et al. (2005)

De acuerdo a la carta de pendientes de la comuna de Sierra Gorda (FIGURA N° 3-4), se extrae que más del 90% de la comuna posee pendientes que no superan los 10°, lo que otorga un escenario desfavorable para la ocurrencia de remociones en masa en la comuna.

En la FIGURA N° 5-6 y FIGURA N° 5-7, se presentan las cartas de pendiente de las áreas de detalle de las localidades de Sierra Gorda y de Baquedano, respectivamente. Estas fueron elaboradas a partir de modelos de elevación construidos con la topografía (curvas de nivel cada 0,5 m) detallada de cada sector.

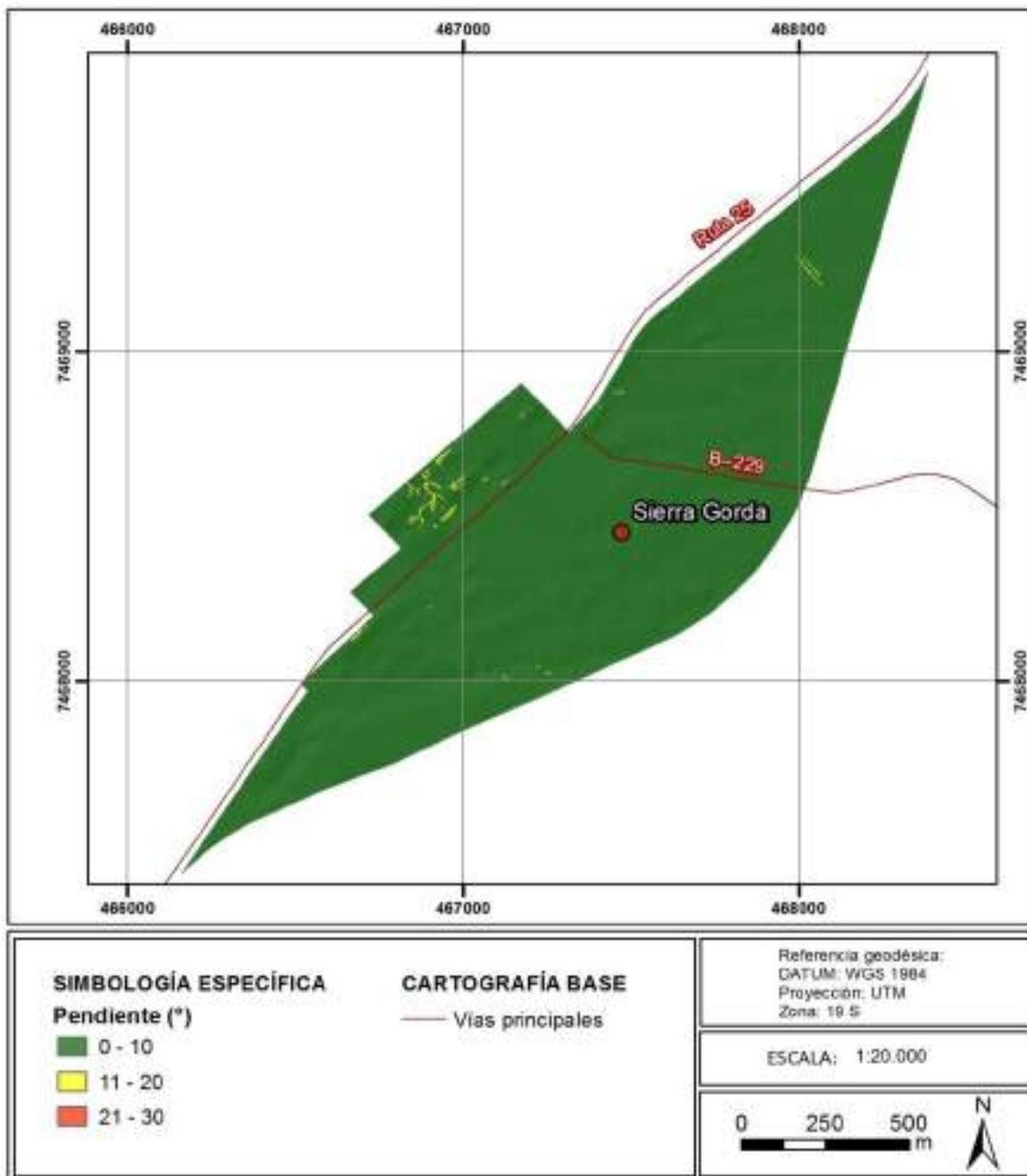
Particularmente, la carta de pendientes del sector de detalle de la localidad de Sierra Gorda, evidencia un territorio prácticamente plano, con 99,6% de superficie que presentan valores menores a 10° (FIGURA N° 5-6), lo que permite descartar la generación de remociones en masa en este sector y, por ende, no realizar una zonificación en esta área de estudio.

Con respecto al sector de detalle de la localidad de Baquedano, el 96,9% del terreno presenta pendientes menores a 10°. Laderas más abruptas se encuentran ubicadas aledañas al bypass que rodea a la localidad de Baquedano, el cual está habilitado para el tránsito de camiones de cargas

especiales. Sin embargo, considerando que la construcción del bypass estuvo sujeta a los estándares de las normas de construcción de carreteras, es decir, acorde con los criterios de estabilidad de taludes correspondientes, se descarta la generación de remociones en masa en este sector. Por lo mismo, no se realizó una zonificación de este tipo de peligros para la localidad de Baquedano

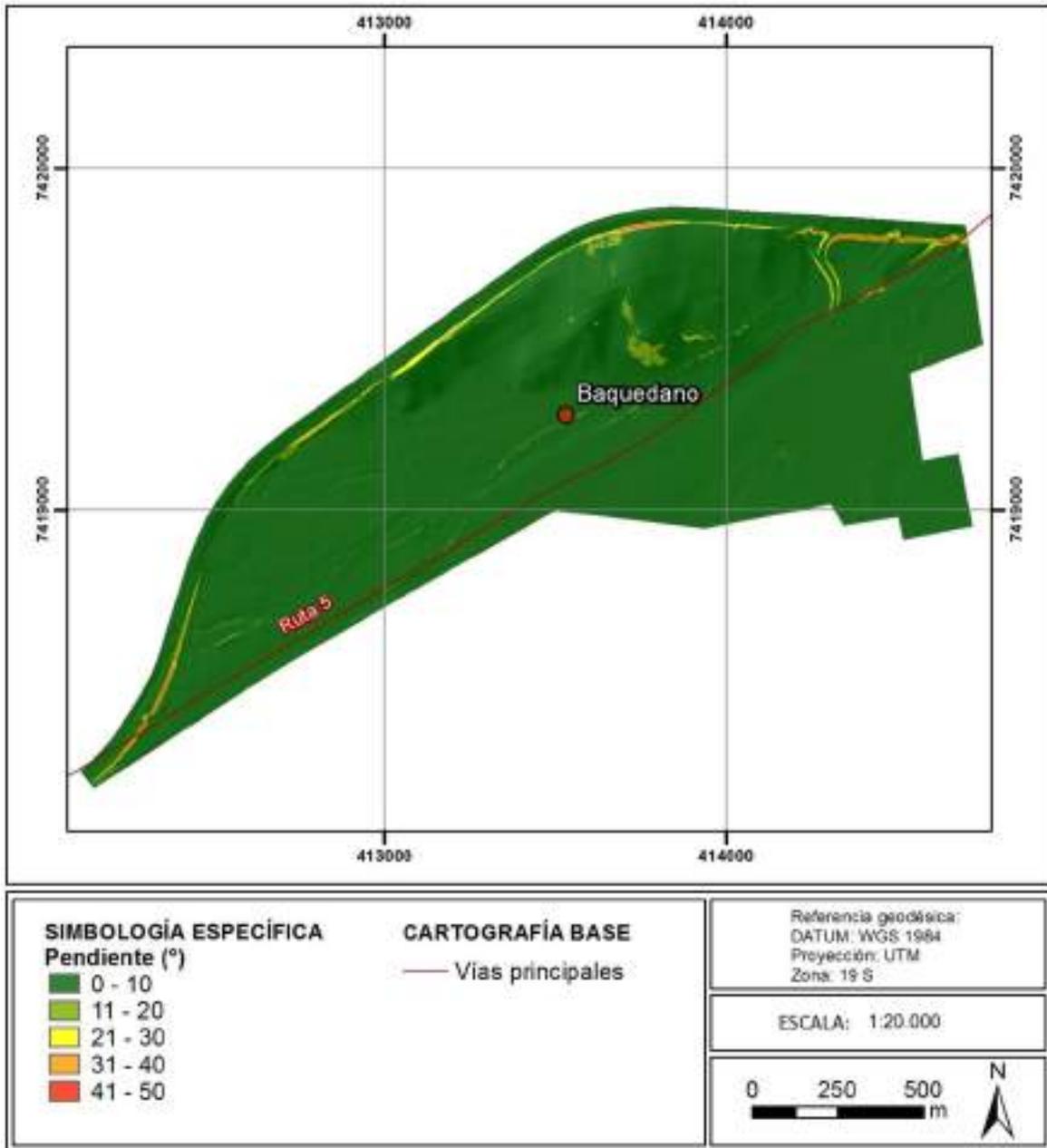
En consecuencia, las áreas urbanas de Sierra Gorda y Baquedano no están expuestas a la ocurrencia de remociones en masa.

FIGURA N° 5-6 Carta de pendientes del área de estudio de detalle de la localidad de Sierra Gorda.



Fuente: Elaboración propia a partir de un modelo de elevación de 1m/pixel.

FIGURA N° 5-7 Carta de pendientes del área de estudio de detalle de la localidad de Baquedano.



Fuente: Elaboración propia a partir de un modelo de elevación de 1m/pixel.

6 RECOMENDACIÓN DE CRITERIOS PARA LA ZONIFICACIÓN

6.1 Recomendaciones para la Zonificación Urbana

Una vez identificados los peligros, definidos los grados de susceptibilidad y el alcance territorial de ellos, es necesario incorporar estos resultados en la zonificación urbana. Esto debe realizarse a través de la aplicación del artículo 2.1.17 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC) y/o tomando otras medidas de planificación acordes a las atribuciones que otorga la LGUC y la OGUC al Plan Regulador Comunal, como por ejemplo, diferenciación de usos de suelo y regulación de la forma e intensidad de su ocupación.

Para poder definir los criterios que permitan incorporar los peligros naturales dentro de la zonificación urbana, es necesario tener claros los criterios utilizados para la definición de las diferentes categorías de susceptibilidad y la zonificación resultante. Es muy relevante comprender que la categorización de susceptibilidad se relaciona con la posibilidad de ocurrencia de un fenómeno dado en un área determinada, pero corresponde a una categorización cualitativa, de carácter relativo, y no. Pese a que el concepto de susceptibilidad no contempla la cuantificación de períodos de retorno ni probabilidades de ocurrencia, sí clasifica según niveles que indican de manera relativa si existe mayor o menor posibilidad de que ocurra un cierto fenómeno. En este sentido, las zonas de muy alta susceptibilidad son aquellas que muy probablemente serán afectadas en caso de ocurrir un evento del peligro analizado, las zonas de alta susceptibilidad serán aquellas afectadas por eventos extremos (en muchos casos son los más grandes de los que se tengan registros históricos) y las de moderada susceptibilidad se asocian a eventos excepcionales, de los que muchas veces no existen registros históricos, y sólo los rasgos geológicos muestran evidencia de su ocurrencia. En términos prácticos, se recomienda que mientras mayor sea la susceptibilidad de un área específica, mayores sean las restricciones y/o condicionantes para su utilización.

Desde esta perspectiva, y con el fin de homologar las categorías de susceptibilidad al lenguaje de la OGUC, se propone aplicar el artículo 2.1.17 a las zonas de alta susceptibilidad (ver CUADRO N° 6-1).

Para las zonas de moderada susceptibilidad, se recomienda en general mitigación con normas urbanísticas que regulen la forma e intensidad de su ocupación, y permitir el equipamiento esencial en el caso de las áreas no consolidadas (educación, salud y seguridad) solo si van acompañadas con obras de mitigación del riesgo, como se muestra en el CUADRO N° 6-1. En las zonas de moderada susceptibilidad no se recomienda aplicar el artículo 2.1.17, debido a que esta categoría de susceptibilidad está asociada a eventos excepcionales de un peligro dado.

6.2 Otras recomendaciones

De manera complementaria, se recomienda que se implementen sistemas de alerta temprana y evacuación en caso de eventos meteorológicos que puedan generar inundaciones terrestres, flujos de detritos y/o barro, o anegamientos. Este sistema debe contemplar un plan de emergencia que debe ser comunicado adecuada y oportunamente 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 de inundaciones, flujos de detritos y/o barro y anegamientos, se recomienda construir obras destinadas a controlar el escurrimiento de aguas superficiales, su intercepción, captación, conducción y descarga controlada hacia cauces establecidos. Todo esto con una asesoría técnica-profesional apropiada, y estudios hidrológicos detallados que permitan acotar los períodos de retornos asociados. Los estudios deben ser realizados por profesionales especialistas en el tema, tal como lo indica la OGUC, en que se determinen el tipo de medidas de mitigación y su adecuado dimensionamiento a los factores locales y tamaño de cada proyecto. En terrenos altamente susceptibles de ser afectados por estos peligros, se recomienda proponer usos sólo con fines recreativos y prohibir la utilización de estas áreas con fines habitacionales, según se indica en el CUADRO N° 6-1.

Finalmente, se recomienda realizar capacitaciones a la población con respecto a los peligros geológicos, considerando sus causas y consecuencias, en las que además se informe adecuadamente acerca de las medidas a adoptar frente a situaciones de emergencia (sistemas de alerta, vías de evacuación, zonas seguras). En caso que la autoridad no pueda dar una alerta oportuna, la educación y conocimiento acerca de los diferentes peligros y riesgos geológicos locales puede salvar vidas, ya que condiciona a una reacción correcta y autónoma por parte de la población. Como ejemplo, es posible citar lo ocurrido durante el terremoto y maremoto del 27 Febrero de 2010, en la zona centro sur de Chile, donde los pobladores de varias localidades se alejaron de la costa por iniciativa propia después del sismo.

CUADRO Nº 6-1 Recomendación de criterios para la zonificación en áreas de riesgo

"ÁREAS DE RIESGO" ART. 2.1.17 OGUC	TIPO DE PELIGRO	GRADO DE SUSCEPTIBILIDAD	DESCRIPCIÓN	CRITERIO DE ZONIFICACIÓN URBANA O.G.U. y C.	
				ÁREA NO CONSOLIDADA	ÁREA CONSOLIDADA
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	INUNDACIÓN POR DESBORDE DE CAUCES NATURALES	ALTA	Corresponde a los cauces que muestran indicios de haber canalizado los últimos flujos de detritos y/o barro ocurridos.	Riesgo (2.1.17) Uso Área Verde	Riesgo (2.1.17) Mitigación con Normas Urbanísticas Excluir equipamiento esencial
		MODERADA	Corresponde a superficies que, estando ubicadas sobre el abanico aluvial activo, no muestran indicios de haber canalizado los últimos flujos de detrito y/o barro, pero que están expuestas a inundación en caso que la capacidad de los cauces sea superada o estos se colmaten. Suelen formar parte de los interfluvios de los cauces agrupados en las zonas de "Alta Susceptibilidad". Para el caso de la localidad de Baquedano, en la zona de la "Quebrada principal", los cauces con actividad más reciente también se consideraron en esta categoría.	Mitigación con Normas Urbanísticas Equipamiento esencial con obras de mitigación	Mitigación con Normas Urbanísticas Todos los uso
	ANEGAMIENTOS	ALTA	Bajos topográficos que muestran conexión con algún cauce natural activo en el pasado. Además de la topografía, se reconocen por la presencia de sedimentos finos (que dan un color café claro en las imágenes satelitales), y por las grietas de desecación observadas en terreno.	Riesgo (2.1.17) Mitigación con Normas Urbanísticas Excluir equipamiento esencial	Riesgo (2.1.17) Mitigación con Normas Urbanísticas Excluir equipamiento esencial
2. Zonas propensas a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas	FLUJOS DE DETRITOS Y/O BARRO	ALTA	Corresponde a los cauces que muestran indicios de haber canalizado los últimos flujos de detritos y/o barro.	Riesgo (2.1.17) Uso Área Verde	Riesgo (2.1.17) Mitigación con Normas Urbanísticas Excluir equipamiento esencial
		MODERADA	Corresponde a superficies que, estando ubicadas sobre el abanico aluvial activo, no muestran indicios de haber canalizado los últimos flujos de detrito y/o barro, pero que están expuestas a inundación en caso que la capacidad de los cauces sea superada o estos se colmaten. Suelen formar parte de los interfluvios de los cauces agrupados en las zonas de "Alta Susceptibilidad". Para el caso de la localidad de Baquedano, en la zona de la "Quebrada principal", los cauces con actividad más reciente también se consideraron en esta categoría.	Mitigación con Normas Urbanísticas Equipamiento esencial con obras de mitigación	Mitigación con Normas Urbanísticas Todos los uso
	DESLIZAMIENTOS DE ROCA Y/O SUELO	SIN SUSCEPTIBILIDAD	-	-	-
	CAÍDA DE ROCAS	SIN SUSCEPTIBILIDAD	-	-	-
3. Zonas con peligro de ser afectadas por actividad volcánica, ríos de lava o fallas geológicas	SISMICIDAD	MUY ALTA	Peligro No Zonificable a la escala del Plan Regulador Comunal	-	-
	VOLCANISMO	BAJA	Peligro No Zonificable a la escala del Plan Regulador Comunal	-	-

Fuente: Elaboración propia.

7 Riesgo antrópico

7.1 Planta Hasser.

Dentro del área de planificación existe solo un área correspondiente a riesgo antrópico en la localidad de Sierra Gorda, derivada de la actividad minera que se desarrolla en la zona. La localidad de Baquedano se encuentra libre de este tipo de riesgos en la actualidad.

El sitio identificado se ubica solo a 200 m del poblado de Sierra Gorda, abarcando una superficie de 5 ha y corresponde a la Planta Hasser, sector donde se encuentran acopios disgregados sobre el nivel del suelo (mayoritariamente de características de polvo fino amarillo o verde-azulado) y acopios de remoción de suelo; piscinas de cemento de formas rectangulares y circulares y; estructura sólida sin techo con los recuadros de las ventanas y puertas§.

El acceso al lugar no está restringido, se accede por la Ruta 25, tomando el empalme ruta 225 en la entrada norte de Sierra Gorda, para continuar por un camino de tierra**.

Figura 7-1 Localización de Planta Hasser, riesgo antrópico, localidad de Sierra Gorda



Fuente: CENMA. Diagnóstico regional de suelos abandonados con potencial presencia de contaminantes. SPPC-54 Planta Hasser.

§ CENMA. Diagnóstico regional de suelos abandonados con potencial presencia de contaminantes. SPPC-54 Planta Hasser.

** CENMA. Diagnóstico regional de suelos abandonados con potencial presencia de contaminantes. SPPC-54 Planta Hasser.

Dada la existencia de población cercana y la potencial contaminación que estos pueden sufrir, se realizó el análisis para los principales contaminantes de la Planta Hasser, por considerarse de alta prioridad, arrojando como resultados los que se enlistan a continuación:

“Las concentraciones estadísticamente representativas de **Zn, Cr, As, Cu, Ni y Mo** en el SPPC-54 Planta Hasser, **superan el estándar** de Canadá **para uso residencial y de parque**.

Las concentraciones estadísticamente representativas de **Cr, Cu y Mo** en el SPPC-54 Planta Hasser, **superan el estándar** de Australia **para uso residencial con jardín**.

La concentración estadísticamente representativa de **Cu** en el SPPC-54 Planta Hasser, **supera el estándar** de México **para uso residencial**.

Las concentraciones estadísticamente representativas de **As y Mo** en el SPPC-54 Planta Hasser, **superan el estándar** del País Vasco, España **para uso urbano**.

Las concentraciones estadísticamente representativas de **Zn, Cr, As, Cu, Ni y Mo** en el SPPC-54 Planta Hasser, **superan el estándar** de Sao Pablo, Brasil **como valor de prevención**.

Las concentraciones estadísticamente representativas de **Zn, Cr, As, Cu, Ni, Pb, Al, Mo, B, Fe y Hg** en el SPPC-54 Planta Hasser, superan los respectivos valores promedio *background* regional (preliminar) considerados como valor de control para este sitio. No obstante, esta superación, por sí misma **no constituye una situación de riesgo para las personas**.

Los valores máximos de concentración en el SPPC-54 para los metales **Cd, Cr, As, Cu y S** son mayores que las respectivas Guías para Evaluación de Medios Ambientales (EMEG) para infantes, por lo que se **recomienda continuar la evaluación de riesgo** para estos metales respecto de **receptores** genéricos de tipo **infantes**.

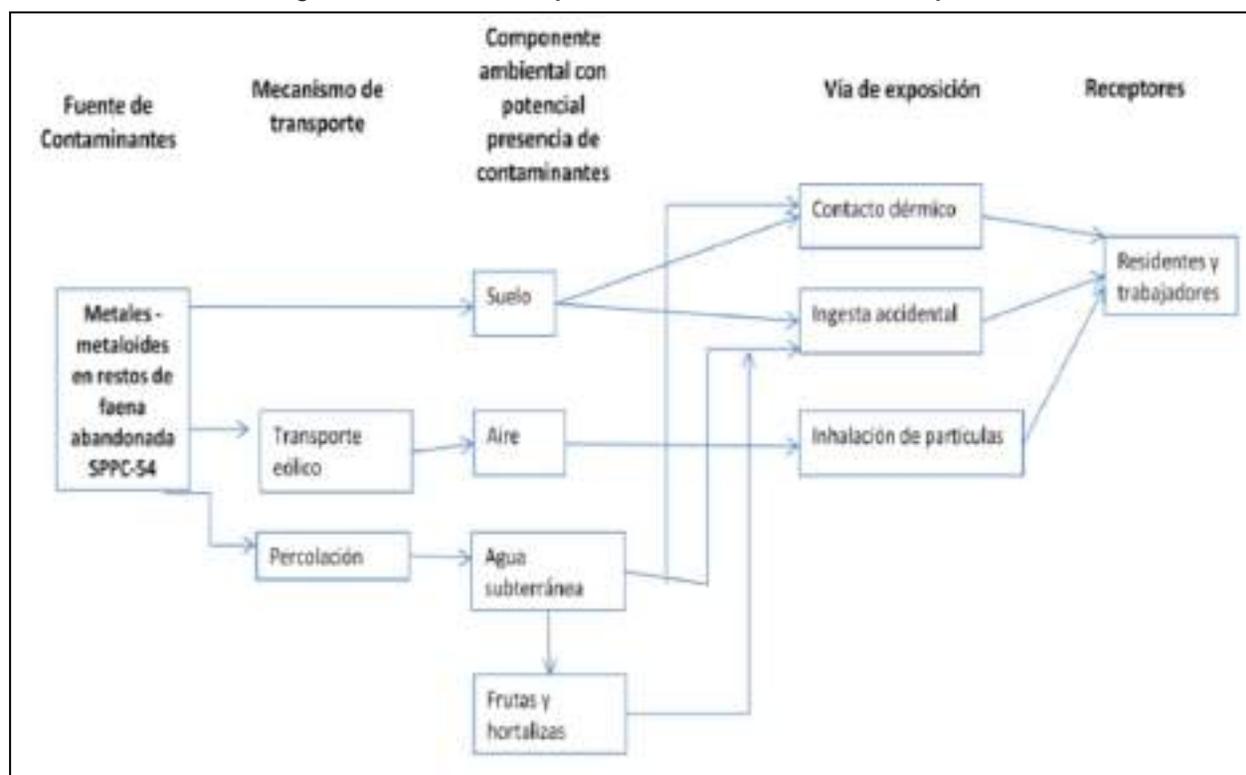
Los valores máximos de concentración en el SPPC-54 Planta Hasser para los metales **Cd, Cr, As y Cu** son mayores que las respectivas Guías para Evaluación de Medios Ambientales (EMEG) para niños, por lo que se **recomienda continuar la evaluación de riesgo** para estos metales respecto de **receptores** genéricos de tipo **niños**.

El valor máximo de concentración de **Cu** en el SPPC-54 Planta Hasser es mayor que el valor Guía para Evaluación de Medios Ambientales (EMEG) para adultos, por lo que se **recomienda continuar la evaluación de riesgo** para este metal respecto de receptores genéricos de tipo **adultos**.

En resumen, estos resultados **NO** permiten **descartar la presencia de contaminantes** en el SPPC-54 Planta Hasser, recomendando el desarrollo de evaluación de riesgo en este sitio^{††}.

†† CENMA. Diagnóstico regional de suelos abandonados con potencial presencia de contaminantes. SPPC-54 Planta Hasser.

Figura 7-2 Modelo conceptual interacción fuente-ruta-receptor.



Fuente: CENMA. Diagnóstico regional de suelos abandonados con potencial presencia de contaminantes. SPPC-54 Planta Hasser.

Así, para este sitio, la principal recomendación corresponde a la realización del estudio de evaluación de riesgo respecto de los metales y receptores indicados anteriormente. Esto es, para Cd en receptores infantes y niños; Cr en receptores infantes y niños; As en receptores infantes y niños; S en receptores infantes y Cu en receptores infantes, niños y adultos^{##}

Desde el punto de vista de la planificación urbana comunal, este sitio ha sido reconocido en el Plano de Zonificación de la localidad de Sierra Gorda (PRC -ZUS- Sierra Gorda) dentro de las Áreas Restringidas al Desarrollo Urbano, como AR-2 - ÁREAS DE RIESGOS POR INTERVENCIÓN HUMANA, tal como se observa en la siguiente figura.

En cuanto a los estándares que denotan riesgo para la población, los resultados del "Diagnóstico regional de suelos abandonados con potencial presencia de contaminantes" para este sitio deberán ser tenidos en cuenta en los estudios fundados de riesgos de los proyectos o construcciones que deseen emplazarse en esta área, a fin de dar cumplimiento a lo estipulado en el Artículo 2.1.17 OGUC.

^{##} CENMA. Diagnóstico regional de suelos abandonados con potencial presencia de contaminantes. SPPC-54 Planta Hasser.

Figura 7-3 Planta Hasser. Área Restringida al Desarrollo Urbano



Fuente: Elaboración propia con base en Plano de Zonificación PRC Sierra Gorda (PRC -ZUS- Sierra Gorda)

7.2 Mina Sierra.

Este sitio se localiza a 370m de la localidad de Sierra Gorda donde funcionó la faena minera Sierra. Cubre una extensión aproximada de 4,8ha y se encuentra aledaña a la Planta Hasser. Actualmente esta área se encuentra abandonada, se desconoce la fecha de cierre de dicha mina.

Se considera una sitio con potencial de contaminación debido a que se observa un sendero desde la planta, de un residuo amarillo (probablemente de azufre) de aproximadamente 2 m de ancho que desemboca (o se acumula) a 360 m hacia el sur, y que está a nivel del suelo.

Por la composición y cantidad de residuos acumulados en el sitio, puede ser considerado una fuente sospechosa de contaminación.

No obstante, debido a que dicho sitio no se encuentra dentro del área de planificación (límite urbano) de la localidad de Sierra Gorda, no es posible establecer restricciones o condicionantes al poblamiento.

Figura 7-4 Localización de Mina Sierra, localidad de Sierra Gorda



Fuente: CENMA. Diagnóstico regional de suelos abandonados con potencial presencia de contaminantes. SPPC-34 Mina Sierra

7.3 Diagnóstico de la calidad del aire por material particulado respirable

Una de las temáticas relevantes desde el punto de vista ambiental de la comuna, se refiere a la presencia de material particulado fracción PM10 y PM 2,5. De acuerdo con el “Informe de Calidad del Aire de la Región de Antofagasta, Actualizado al 31 Diciembre 2013^{§§}”, en el que se registra información de tres estaciones de monitoreo para la localidad de Sierra Gorda

- Estación Sierra Gorda, autorizada EMRP a partir del 13 de septiembre del año 2004, a cargo de minera Spence S.A. (ex Compañía Minera Río Chilex S.A.), realiza monitoreo permanente de MP10 desde el año 2003.
- Estación Poblado de Sierra Gorda, autorizada EMRP a partir del 29 de julio del año 2005, a cargo de minera El Tesoro S.A. Durante los años 1993, 1994 y 2003 al 2005 realiza sólo campañas. Desde el año 2006 realiza monitoreo de MP10 permanente.
- La estación Sierra Gorda (SCM), autorizada EMRP para MP10, a partir del 21 de noviembre de 2012, a cargo de Minera Sierra Gorda S.C.M. Adicionalmente, mide MP2.5 (cabe señalar, que la resolución de representatividad poblacional para esta estación, no especifica claramente si el contaminante MP2.5 está incorporado dentro de la representatividad). Esta estación comienza a monitorear en Octubre del año 2012.

^{§§} CENMA. 2014. Informe final “Evaluación de la calidad del aire en la Región de Antofagasta”. y Secretaria Regional Ministerial del Medio Ambiente de Antofagasta. Secretaria Regional Ministerial del Medio Ambiente de Antofagasta.

7.3.1 Material Particulado Respirable MP10

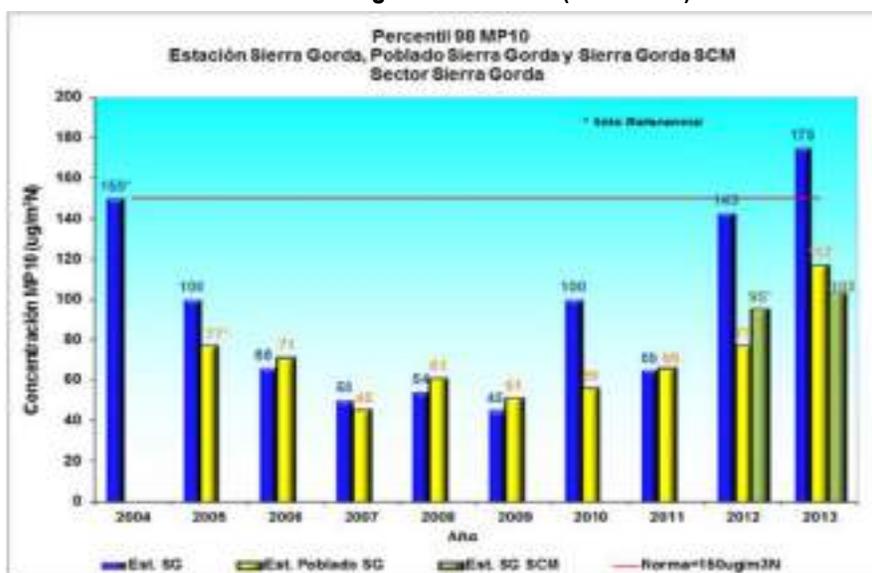
Respecto a la Norma Diaria de Material Particulado Respirable MP10 en la estación Sierra Gorda, el valor del percentil 98 para el año 2004 correspondió a 150 mg/m³N, valor que superó la norma diaria (información referencial, debido a que esta estación fue declarada EMRP en el mes de septiembre del año 2004).

Desde el año 2005 al 2007, se observó una disminución del valor del percentil 98, encontrándose todos estos años bajo norma y latencia, con un valor de percentil 98 de 100, 66 y 50 mg/m³N, respectivamente, para cada año. Para el año 2008, el percentil 98 fue de 54 mg/m³N, valor bajo la norma y para el año 2009 fue de 45 mg/m³N, nuevamente bajo la norma. Para el año 2010, el valor del percentil 98 fue de 100 mg/m³N, valor nuevamente bajo la norma. Finalmente para los años 2011, 2012 y 2013 los valores del percentil 98 fueron de 65, 143 y 175 µg/m³N respectivamente, encontrándose el año 2012 en situación de latencia, y el año 2013 en saturación

La estación Poblado Sierra Gorda, durante el 2005 estuvo bajo la norma, con un valor de percentil 98 de 77 µg/m³N. Para el año 2006, 2007, 2008 y 2009, el valor del percentil 98 fue de 71, 45, 61 y 51 µg/m³N respectivamente, valores bajo la norma diaria. Para el año 2010, el valor del percentil 98 fue de 56 µg/m³N, valor bajo la norma. Los años 2011 y 2012, los valores de percentil 98 fueron de 66 y 77 µg/m³N respectivamente, ambos bajo la norma y latencia. Finalmente, el año 2013 el valor de percentil 98 fue de 117 µg/m³N, valor bajo la norma.

Para la estación Sierra Gorda SCM, el valor del percentil 98 para los años 2012 y 2013 fue de 95 µg/m³N, y 103 mg/m³N respectivamente, valores bajo la norma y latencia.

Gráfico 7-1 Registros de PM10 (2004-2013)



Fuente: "Informe de Calidad del Aire de la Región de Antofagasta, Diciembre 2014".

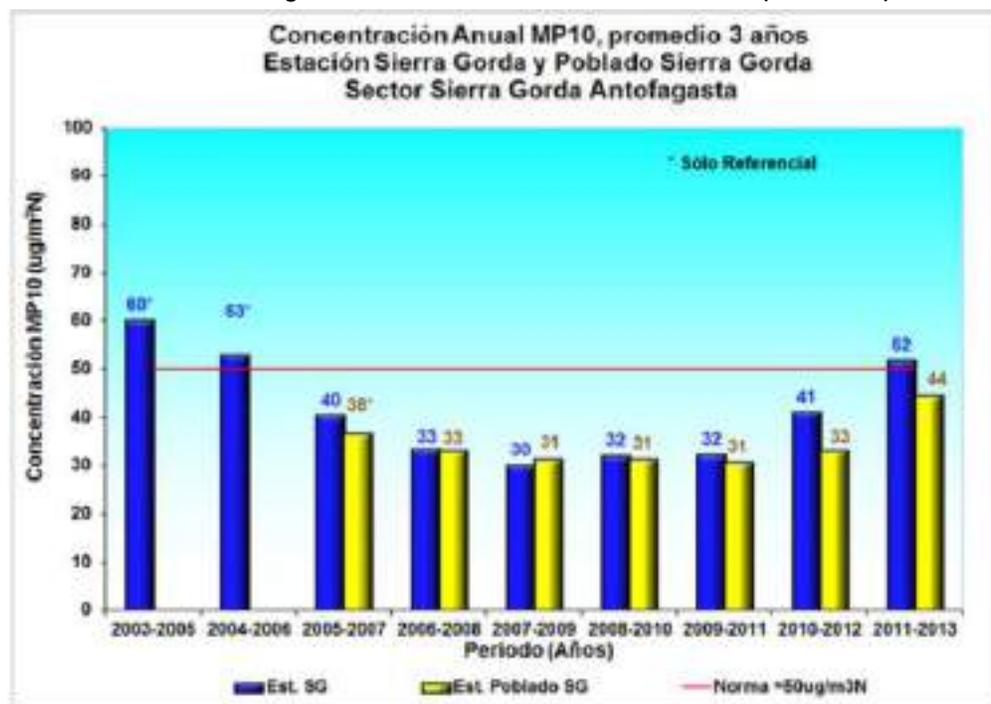
La norma anual de MP10, calculada para los periodos 2003-2005 y 2004-2006 estuvo sobre la norma para la estación Sierra Gorda, con un valor de 60 y 53 mg/m³N, respectivamente, para cada periodo (información referencial, debido a que esta estación fue declarada EMRP en el mes de septiembre del año 2004). El periodo 2005-2007, esta estación, estuvo en situación de latencia, con 40 mg/m³N, mientras que

para los periodos 2006-2008 y 2007-2009 estuvo bajo la norma y latencia, con un valor de concentración de MP10 de 33 y 30 mg/m³N, respectivamente. Para el periodo 2008-2010, el valor de concentración anual de MP10 fue de 32 mg/m³N, valor bajo la norma. Finalmente, para los periodos 2009-2011 y 2010-2012, los valores de concentración anual de MP10 fueron 32 y 41 mg/m³N respectivamente, valores bajo la norma, sin embargo, el último periodo indicado se encuentra en situación de latencia. Para el periodo 2011-2013 la estación se presenta sobre la norma con un valor de 52 mg/m³N

La norma anual de MP10, calculada para el periodo 2005-2007, estuvo bajo la norma para la estación Poblado Sierra Gorda, con 36 mg/m³N (información referencial, debido a que esta estación fue declarada EMRP en julio de 2005 y no tiene la cantidad de datos requeridos por la norma).

Para los periodos 2006-2008 y 2007-2009, estuvo bajo la norma y latencia, con un valor de concentración de 33 y 31 mg/m³N (se elimina el valor promedio mensual del mes de abril de 2008 de la estación Poblado Sierra Gorda, debido a que no cuenta con la cantidad de datos exigidos por la norma). Para el periodo 2008-2010, el valor de concentración anual de MP10 fue de 31 mg/m³N, valor bajo la norma. Finalmente para los periodos 2009-2011, 2010-2012 y 2011-2013, los valores de concentración de MP10 fueron 31, 33 y 44 mg/m³N, todos valores bajo la norma, sin embargo, el periodo 2011-2013 se encuentra en situación de latencia. El siguiente gráfico muestra los datos registrados entre los años 2003 hasta el 2013.

Gráfico 7-2 Registro de Concentraciones Anuales PM10 (2003-2013)



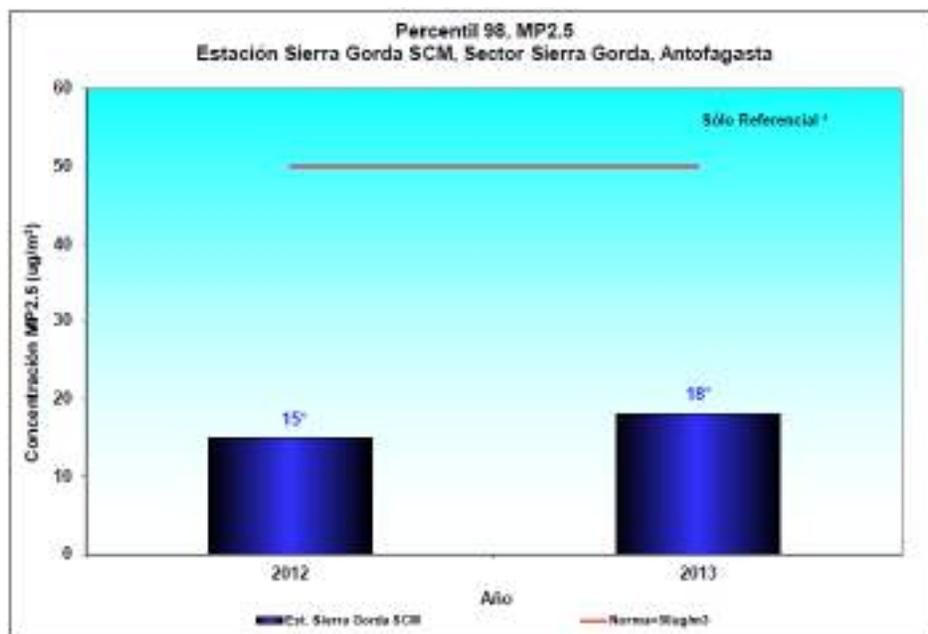
Fuente: "Informe de Calidad del Aire de la Región de Antofagasta, Diciembre 2014".

7.3.2 Material Particulado Respirable MP2.5

La estación Sierra Gorda SCM monitorea este contaminante desde el mes de Octubre de 2012. La empresa a cargo de los datos entrega información normalizada para este contaminante, hasta el mes de diciembre de 2013. Sin embargo, en este informe, la unidad de concentración para el MP2.5 se indicará sin normalizar, ya que así lo establece la norma. Adicionalmente, la resolución de representatividad

poblacional para estas estaciones, no especifica claramente si el contaminante MP2.5 está incorporado dentro de la representatividad. Por lo anterior, los resultados se indican a modo referencial. La norma diaria para el MP2.5 establece una concentración de 50 mg/m³. El percentil 98 para el año 2012 y 2013 fue de 15 mg/m³ y 18 mg/m³ respectivamente, ambos valores bajo la norma diaria, tal como se observa en el siguiente gráfico

Gráfico 7-3 Percentil 98 MP2.5, Estación Sierra Gorda SCM



Fuente: "Informe de Calidad del Aire de la Región de Antofagasta, Diciembre 2014".

La norma anual para el MP2.5 establece una concentración máxima de 20 mg/m³. No es posible evaluar el cumplimiento de la norma anual, ya que no se cuenta con la cantidad de datos requeridos por la norma. A modo referencial, el promedio aritmético para el año 2012 y 2013 fue de 9 mg/m³ y 10 mg/m³ respectivamente, ambos bajo el valor de la norma anual

7.3.3 Evaluación de la Calidad del Aire

Con base en la información analizada en el Informe de Calidad del Aire de la Región de Antofagasta, Diciembre 2014, se concluye que en las estaciones Poblado Sierra Gorda y Sierra Gorda (SCM), se cumplió la norma diaria de MP10 (referencial para la estación Sierra Gorda (SCM)), sin embargo, la estación Sierra Gorda se encontraría sobre dicha norma. Respecto a la norma anual, la estación Sierra Gorda, se encontraría en saturación, mientras que la estación Poblado Sierra Gorda se encontraría en situación de latencia. Para el MP2.5, la norma diaria se cumplió en la estación Sierra Gorda (SCM) (referencial).

Teniendo en cuenta estos antecedentes, cabe mencionar la conformación de la Mesa de Trabajo público-privada aprobada mediante la R.E. N°873, de fecha 10 de septiembre de 2014 del Ministerio del Medio Ambiente, conformada por la I.M. de Sierra Gorda, SEREMI de Salud, Ministerio del Medio Ambiente y empresas privadas, entre las que se encuentran las mineras Sierra Gorda S.C.M., Spence S.A. y Centinela S.A., instancia que se constituyó con la finalidad de ejecutar acciones para mejorar la calidad del aire de la localidad de Sierra Gorda.

8 REFERENCIAS

- (DGA), D. G. d. A., 1987. *Balance Hídrico Nacional*, Santiago, Chile: Ministerio de Obras Públicas.
- (GAC), G. A. C., 2007. *Línea de Base Proyecto Esperanza, alternativa Michilla*, Santiago, Chile: s.n.
- (SKM), S. K. M., 2012. *Evaluación Ambiental Proyecto Sulfuros Lomas Bayas*, s.l.: Compañía Minera Xstrata Loma Bayas.
- Abele, G., 1984. Derrumbes de montañas y morrenas en los Andes Chilenos.. *Revista de Geografía de Norte Grande.*, Volumen 2, pp. 17-30. Santiago.
- Aguirre, L., 1960. Geología de los Andes de Chile Central, provincia de Aconcagua.. *Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago, Chile.*, Issue 9, p. 70.
- Aguirre, L. & Egert, E., 1965. *Cuadrángulo Quebrada Marquesa, Provincia de Coquimbo*, Santiago: Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile, No. 15, 92 p..
- Allmendinger, R. G. G. Y. J. H. G. y. I. B., 2005. Trench-parallel shortening in the Northern Chilean Forearc: Tectonics and climatic implications. *GSA Bulletin*, 117(1-2), pp. 89 - 104.
- 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.
- Armijo, R. y otros, 2010. The West Andean Thrust, the San Ramón Fault, and the seismic hazard for Santiago, Chile. *Tectonics*, 29(2), pp. 1-34.
- Armijo, R. y otros, 2012. The West Andean Thrust, the San Ramón Fault, and the seismic hazard for Santiago, Chile. *Tectonics*, Volumen 29, p. TC2007.
- Arriagada, C., Cobbold, P. & Roperch, P., 2006. Salar de Atacama Basin: A record of compressional tectonics in the Central Andes since the mid-Cretaceous. *TECTONICS*, 25(TC1), pp. 1008-1029.
- Ayala, F., 1985. *Geología y prevención de daños por inundaciones.*, Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Baeza, O., 1999. *Annálisis de litofacies, evolución depositacional y análisis estructural de la Formación Abanico en el área comprendida entre los rios Yeso y Volcán. Región Metropolitana.*, Unpublished Memoir Thesis. Santiago: Departamento de Geología. Universidad de Chile, 120 p..
- Baker, V., Kochel, R. & Patton, P., 1988. *Flood Geomorphology. John Wiley and Sons, Chichester, UK, 503 pp.*, s.l.: s.n.
- Barrientos, S., 1980. *Regionalización sísmica de Chile MSc thesis*, Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Barrientos, S., 1997. Central Chile: An example of quasi-static crustal behaviour. *The Island Arc*, Volumen 6, pp. 281-287.
- Basso, M., 2004. *Carta Baquedano, Región de Antofagasta, SERNAGEOMIN*, Santiago: Serie geología básica. N° 82, 22 p..
- Beck, S., Barrientos, S., Kausel, E. & Reyes, M., 1998. Source characteristics of historic earthquakes along the central Chile subduction zone. *Journal of South American Earth Sciences*, 11(2), pp. 115 - 129.
- Belmonte-Pool, J., 1997. *Análisis del contacto sismogénico interplaca a lo largo de Chile*, Santiago: Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias, mención Geofísica, Universidad de Chile..

- Benado, D., 2000. *Estructuras y estratigrafía básica de terrazas marinas en el sector costero de Altos de Talina y Bahía Tongoy: Implicancia neotectónica*. Tesis, Santiago, Chile.: Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Bloom, A. L., 1998. *Geomorphology: a systematic analysis of late Cenozoic landforms*. s.l.:Prentice Hall. Upper Saddle River, N.J., 482 p..
- Börgel, R., 1983. *Geomorfología*, Santiago: Instituto Geográfico Militar.
- Borgel, R., 1999. *Estudio de riesgos geomorfológicos en áreas montañosas "Comuna de Pudahuel"*. Santiago de Chile, s.l.: s.n.
- Campbell, D., 2005. *Termocronología del sector comprendido entre los ríos Rocin y Aconcagua: Implicancias en la evolución Meso-Cenozoica de la Zona.*, Santiago de Chile.: Memoria de Título, Universidad de Chile. 113p..
- Carrizo, D. G. G. y D. T. J., 2005. Constricción Neógena en la Cordillera de la Costa, norte de Chile: neotectónica y datación de superficies con ^{21}Ne cosmogénico. *Revista Geológica de Chile*, 35(1), pp. 1 - 38.
- Carrizo, D., González, G. & Dunai, T., 2008. Constricción neógena de la Cordillera de la Costa, norte de Chile: neotectónica y datación de superficies con ^{21}Ne cosmogénicos.. *Revista Geológica de Chile*, 35(1), pp. 1-38.
- Carter, W. & Aguirre, L., 1965. Structural geology of Aconcagua Province and its relationship to the Central Valley graben.. *Geological society of America Bulletin*. Vol. 84, pp. 651 - 664.
- Centeno, J., Fraile, M., Otero, M. & Pividal, A., 1994. *Geomorfología Práctica. Ejercicios de fotointerpretación y planificación geoambiental*.. Madrid: Ed. Rueda.
- Charrier, R. y otros, 2002. Evidence for Cenozoic extensional basin development and tectonic inversión south of the flat-slab segment southern Central Andes, Chile (33° - 36°).. *Journal of South American Earth Sciences*, Volumen 15, pp. 117-139.
- 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.
- Chester, S., 2008. *A wildlife guide to Chile*. 1° Ed. ed. Princeton, New Jersey: Princeton University.
- Comte, D. y otros, 1986. The 1985 central Chile earthquake: A repeat of previous great earthquakes in the region?. *Science*, Volumen 233, pp. 393-500.
- Comte, D. y otros, 2002. Seismicity and stress distribution in the Copiapo, northern Chile subduction zone using combined on- and off-shore seismic observations. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 132(1-3), pp. 197-217.
- Comte, D. & Pardo, M., 1991. Reappraisal of great historical earthquakes in the northern Chile and southern Peru seismic gaps.. *Natural Hazards*, 4(1), pp. 23-44.
- Conte, A., 1986. Vulnerabilidad a los eventos catastróficos de los valles de Elqui, Limarí y Choapa. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, Volumen 29, pp. 103-130.
- 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.
- Cyranosky, D., 2011. Japan faces up to failure of its earthquake preparations.. *Nature*, Issue 471, pp. 556-557.

- D'Agostino, V., Cesca, M. & Marchi, L., 2009. *Field and laboratory investigations of runout distances of debris flows in the Dolomites (Eastern Italian Alps)*. *Geomorphology*, pp. p. 1-11., s.l.: s.n.
- Darwin, C., 1846. *Geological observations of South America (Part III of The geology of the voyage of the Beagle)*. London: Smith, Elder & Co Eds..
- Dedios, P., 1967. *Cuadrángulo Vicuña, Provincia de Coquimbo*. , Santiago: Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile, No. 28, 20 p..
- 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.
- Díaz, A., 1996. *Geología de la Formación Farellones e el área del Río Colorado, Cordillera de los Andes de la V región, norte del Río Aconcagua*., s.l.: Memoria de Título, Universidad de Chile. 69 p..
- Díez Herrero, A., 2002a. *Condicionantes geomorfológicos de las avenidas y cálculos de caudales y calados*. Barcelona: Ariel, Ariel Ciencia.
- Díez, A. & Pedraza, J., 1996. *Procesos fluviales*, Madrid: Ruda.
- Díez-Herrero, A., Lain-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.
- Dragicevich, M., 1982. *Nota sobre medidas de gravedad en el sector de la cuenca Santiago. Tralka, Vol. 2, p. 207-221, Santiago*., s.l.: s.n.
- Dragicevich, M. & Meinardus, H., 1962. *Perfil sísmico de refracción (Pudahuel) (Inédito)*. Universidad de Chile, Instituto de Geofísica, Santiago., s.l.: s.n.
- El Mercurio de Antofagasta, 2011. *Suspenden obras por derrumbes en Tocopilla*, Antofagasta: s.n.
- El Mercurio de Antofagasta, 2015. *Alcaldes hacen su balance de los daños en infraestructura y viviendas*. [En línea] Available at: <http://www.mercurioantofagasta.cl/impresa/2015/03/27/full/cuerpo-principal/14/> [Último acceso: 21 03 2016].
- El Nortero, 2015. *Comienzan catastro en Sierra Gorda y Baquedano para ayuda con techumbres nuevas*. *El Nortero*, 28 Marzo, pp. <http://www.elnortero.cl/noticia/sociedad/comienzan-catastro-en-sierra-gorda-y-baquedano-para-ayudar-con-techumbres-nuevas>.
- Emparan, C. & Pineda, G., 1999. *Área Condoriaco-Rivadavia, Región de Coquimbo. Mapas Geológicos 12, escala 1:100.000*, Santiago, Chile.: Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).
- Emparán, C. & Pineda, G., 1999. *Mapa geológico área Condoriaco-Rivadavia, Región de Coquimbo. Escala 1:100.000. No. 12*, s.l.: Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Emparan, C. & Pineda, G., 2000. *Área La Serena-La Higuera, Región de Coquimbo. Mapas Geológicos 1:100000.18*, Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Emparán, C. & Pineda, G., 2005. *Área Andacollo-Puerto Aldea, Región de Coquimbo. Carta Geológica de Chile. Serie de Geología Básica 96, escala 1:100000*, Santiago, Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Emparán, C. & Pineda, G., 2006. *Área Andacollo-Puerto Aldea, Región de Coquimbo. Carta Geológica de Chile. Serie de Geología Básica 96, escala 1:100000*, Santiago, Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería.

- 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 Management, p. 657-669..
- 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 Management, p. 657-669..
- 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*. En: Eberhardt, E., Hungr, O., Fell, R., Couture, E. (eds). Vancouver, Proceedings, International Conference on Landslide Risk Management, p. 657-669...
- Flores, V., 2010. *Modelling Aeolian Transport Processes: Implications for the Paleoclimate of the Coastal Atacama Desert*, Santiago, Chile: Universidad de Chile.
- Fuentes, F., Vergara, M., Aguirre, L. & Féraud, G., 2002. Relaciones de contacto de unidades volcánicas terciarias de los Andes de Chile central (33°S): una reinterpretación sobre la base de dataciones 40Ar/39Ar.. *Revista Geológica de Chile.*, 29(2), pp. 207-225.
- Galaz-Mandakovic, D., 2008. *Tocopilla y su Historia*. [En línea] Available at: <http://tocopillaysuhistoria.blogspot.com/> [Último acceso: 28 Enero 2014].
- Gallego, A., 1994. *Paleoambiente y mecanismo de depositación de la secuencia sedimentaria que aflora en el sector del Polpaico, Región Metropolitana, Chile.*, Santiago: Memoria de Título, Universidad de Chile. 476p..
- Gallego, A., 1994. *Paleoambiente y mecanismos de depositación de la secuencia sedimentaria que aflora en el sector de Polpaico, región Metropolitana, Chile. Memoria de Título y tesis de Magíster (Inédito)*. Universidad de Chile, Departamento de Geología, 426 p., Santiago., s.l.: s.n.
- Gana, P. & Wall, R., 1997. Evidencias geocronológicas 40Ar/39Ar y K/Ar de un hiatus Cretácico Superior.Eoceno en Chile Central (33°-33° 30'S).. *Revista Geológica de Chile.*, 24(2), pp. p. 145-163..
- Gardeweg, M., Sparks, R. & Matthews, S., 1998. *Evolution of Lascar Volcano, northern Chile*. *Journal of the Geological Society, London* 155: 89-104., s.l.: s.n.
- Giraud, R. & Shaw, L., 2007. *Landslide Suceptibility Map of Utah*, s.l.: Utah Geological Survey, 16 p..
- Giraud, R. & Shaw, L., 2007. *Landslide Suceptibility Map of Utah*. , s.l.: Utah Geological Survey, 16 p..
- Godoy, E. & Lara, L., 1994. *Segmentación Estructural Andina a los 33°-34°: Nuevos datos en la Coridllera Principal.*, s.l.: VII Congreso Geológico Chileno, Concepción. Vol.2, p. 373-381..
- Godoy, E., Schilling, M., Solari, M. & Fock, A., 2009. *Geología del Área Rancagua-San Vicente de Tagua Tagua, Región del Libertador General Bernardo O'Higgins*. Servicio Nacional de Geología y Minería, *Carta Geológica de Chile. Serie Geología Básica 118: 50 p., 1 mapa escala 1:100.000*. Santiago.. s.l.:s.n.
- Godoy, E., Yañez, G. & Vera, E., 1999. Inversion of an Oligocene volcano-tectonic basin and uplifting of its superimposed Miocene magmatic arc in the Chilean Central Andes: First seismic and gravity evidences.. *Tectonophysics.*, Volumen 306, pp. 217-236.
- Golubev, G., 1967. *Avalanchas y corrientes de barro en Chile.*, Santiago.: Universidad de Chile, Departamento de Geografía, Informativo Geográfico, N° único, p. 31-74. .

- Gonzalez de Vallejo, L., Ferre, M., Ortuño, L. & Oteo, C., 2002. *Ingeniería Geológica*. Segunda ed. Madrid: Pearson Educación.
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L. & Oteo, C., 2002. 2002. *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Education.
- González-Ferrán, O., 1995. *Volcanes de Chile*. Santiago: Instituto Geográfico Militar, 410 pág.
- González-Ferrán, O., 1995. *Volcanes de Chile. Instituto Geográfico Militar, VI.*, Santiago: s.n.
- González-Ferrán, O., 1999. *Volcanes de Chile. Instituto Geográfico Militar, 640 p.* Santiago. , s.l.: s.n.
- González, G. C. J. C. D. M. A. y. S. H., 2003. The link between forearc tectonics and Pliocene-Quaternary deformation of the Coastal Cordillera, northern Chile.. *Journal of South American Earth Sciences*, 16(5), pp. 321-342.
- González, G., Dunai, T., Carrizo, D. & Allmendiger, R., 2006. Young displacements on the Atacama Fault System, northern Chile from field observation and cosmogenic ²¹Ne concentration. *Tectonics*, Volumen 25.
- Graña, F., 2007. *Crónicas y recuerdos de una inundación en el valle del Elqui*, Vicuña: Manuscrito inédito, 16 pp..
- 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., 1987. *Deslizamiento en camino Los Andes-Portillo, sector Guardia Vieja, V Región (Inédito)*., Santiago.: Servicio Nacional de Geología y Minería, 20 p. .
- Hauser, A., 1988. *Informe en relación con el desarrollo de subsidencia asociada a laboreos mineros abandonados, en terrenos ex-mina La Africana, comuna de Pudahuel, Región Metropolitana*, Santiago: Informe inédito. Servicio Nacional de Geología y Minería..
- Hauser, A., 1990. *Carta Hidrogeológica de Chile escala 1 : 250.000, Hoja Rancagua, VI Región. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago.* s.l.:s.n.
- 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.
- lida, K., 1963. A relation of earthquake energy to tsunami energy and the estimation of the vertical displacement in a tsunami source. *Journal of Earth Science*, 2(1), pp. 49-67.
- lida, K., 1963. A relation of earthquake energy to tsunami energy and the estimation of the vertical displacement in a tsunami source,. *J. Earth, Sci.*, 2(1), pp. 49-67.
- Inamura, A., 1942. History of Japanese Tsunamis. *Kayo-No-Kagaku*, Volumen 2, pp. 74-80.
- Inamura, A., 1942. History of Japanese Tsunamis. *Kayo-No-Kagaku (Oceanography in Japanese)*, Volumen 2, pp. 74-80.
- Inamura, A., 1949. List of tsunamis in Japan. *J. Seismol. Soc. Japan (in Japanese)*, Volumen 2, pp. 23-28.
- Inamura, A., 1949. List of Tsunamis in Japan. *Journal of Seismological Society of Japan*, Volumen 2, pp. 23-28.
- Inzunza, J., 2004. *Meteorología descriptiva. Capítulo 15: Climas de Chile*, s.l.: Universidad de Concepción, Departamento de Geofísica.
- Isaacks, B., 1988. Uplift of the Central Andes plateau and bending of the Bolivian Orocline.. *Journal of Geophysical Research*, Volumen 93, pp. 3211-3231.

- Jaros, J. & Z. J., 1969. La relación estructural entre las formaciones Abanico y Farellones en la Cordillera del Mesón, Provincia de Aconcagua, Chile.. *Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago*, Issue 34, p. 8.
- JTC-1, 2008. Guidelines for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 102(3-4), pp. 85-98.
- JTC-1, 2008. Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes, 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning , for land use planning.. *Engineering Geology*, Volumen 103, pp. 85-98.
- Kausel, E. & R. D., 1992. Relaciones entre parámetros focales y macrosísmicos de grandes terremotos chilenos.. *Revista Geofísica, Volumen 37, pp. 36 - 194.*, Volumen 37, pp. 36-194.
- Kausel, E. & Campos, J., 1992. The Ms = 8 tensional earthquake of 9 December 1950 of northern Chile and its relation to the seismic potential of the region. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 72(3 - 4), pp. 220 - 235.
- Kausel, E. & Ramírez, D., 1992. Relaciones entre parámetros focales y macrosísmicos de grandes terremotos chilenos. *Revista Geofísica, Volumen 37, pp. 36 - 194.*
- Kausel, E. & Ramírez, D., 1992. Relaciones entre parámetros focales y macrosísmicos de grandes terremotos chilenos. *Rev. Geofísica, Volumen 37, pp. 159-194.*
- Kausel, E. & Ramírez, D., 1992. Relaciones entre parámetros focales y macrosísmicos de grandes terremotos chilenos. *Revista Geofísica, Issue 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.
- Khazaradze, G. & Klotz., 2003. Short and long-term effects of GPS measured crustal deformation rates along the South-Central Andes. *Journal of Geophysical Research*, Volumen 108, p. 1-13.
- Klohn, C., 1960. Geología de la Cordillera de los Andes de Chile Central, Provs. de Santiago, Colchagua y Curicó.. *Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago.*, Issue 8, p. 95.
- La Estrella de Tocopilla, 2013. *Aludes dejaron bloqueada ruta Tocopilla Iquique*, Tocopilla: s.n.
- Lara, L. & Rauld, R., 2003. *Diagnóstico de la geología ambiental de las grandes ciudades de Chile.*, Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, 182 pág.
- Larraín, P. & Simpson-Housley, P., 1994. *Percepción y Prevención de Catástrofes Naturales en Chile*. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago: s.n.
- Lastra, J., Fernández, E., Díez-Herrero, A. & Marquinez, J., 2008. *Flood hazard delineation combining geomorphological methods: an example in the Northern Iberian Peninsula*. *Natural Hazards*, 45(2), 277-293., s.l.: s.n.
- Lemoine, A., Madariaga, R. & Campos, J., 2001. Evidence for earthquake interaction in central Chile: The July 1997 - September 1998 sequence. *Geophysical Research Letters*, Volumen 28, pp. 2742 - 2746.
- Levi, B., 1968. *Cretaceous volcanic rocks from a part of the Coast Range west from Santiago, Chile: a study in lithologic variation and burial metamorphism in the andean Geosyncline*. PhD Thesis (Unpublished), University of California, 113 p., Berkeley , s.l.: s.n.
- Lockridge, P., 1985. *Tsunamis in Perú-Chile*, Boulder: National Geophysical Data Center. Report SE-39..
- Madariaga, R., 1998. *Sismicidad de Chile*, s.l.: Física de La Tierra. tS5N: 0214-4557, n° 10: 221-255.

- Marquinez, J. & Lastra, J. F. E., 2006a. *Metodología utilizada para cartografiar la peligrosidad de inundaciones en las cuencas del Norte*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, Serie Medio ambiente, Riesgos Geológicos nº7.
- Marquinez, J. & Lastra, J. F. E., 2006b. *Estudio de inundabilidad en la ciudad de Sarria (Lugo)*. *Tecnoambiente*, 160, 76-79., s.l.: s.n.
- Martínez-Pardo, R. Gallego, A. & Martínez-Guzmán, R., 1994. Middle Albian marine planktonic microfossils from the Santiago basin, Central Chile: their depositional and paleogeographic meaning.. *Revista Geológica de Chile*, 21(2), pp. 173-187.
- 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.
- Monastersky, R., 2011. Giant shock rattles ideas about quake behaviour.. *Nature*, Issue 471, p. 274.
- Moreno, H., 1993. *Erupciones volcánicas en Chile: procesos y riesgos asociados*. s.l., I Jornadas Nacionales de Vulcanología, Medio Ambiente y Defensa Civil. Pág. 161-170.
- Moscoso, R., Nasi, C. & Salinas, O., 1982. *Geología de la Hoja Vallenar y parte Norte de la Hoja la Serena*. *Carta Geológica de Chile*., Santiago. 55: Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Moscoso, R. & Padilla, H. & R. S., 1982. *Hoja de los Andes, Región de Valparaíso, Nº 52, 67 p.*, s.l.: Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile..
- Mpodozis, C. & Cornejo, P., 1986. *Hoja Pisco Elqui, escala 1:250.000*. *Carta Geológica de Chile*, s.l.: Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Mpodozis, C. & Cornejo, P., 1988. *Hoja Pisco Elqui, IV Región de Coquimbo*. *Carta Geológica de Chile*. 68. 1:250.000, Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería..
- 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.
- 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.
- Natural Resources Canada, 2011. *Natural Resources Canada*. [En línea] Available at: <http://atlas.nrcan.gc.ca/auth/english/maps/environment/naturalhazards/tsunami/1> [Último acceso: 25 11 2011].
- Navarro, M., 2001. *Estratigrafía y estilo estructural de las formaciones del margen occidental de la Cordillera Principal en el Norte de la VI Región*., Santiago: Memoria de Título. Universidad de Chile, 77 p..
- Nishenko, S. P., 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 Research*, 90(B5), pp. 3589-3615.
- Nyström, J., Vergara, M., Morata, D. & Levi, B. B., 2003. Tertiary volcanism during extensión in the Andes foothills of central Chile (33°15'-33°45').. *Geological Society of America Bulletin*., 115(12), pp. 1523-1537..

- 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.
- ONEMI, 2002. *Informe Consolidado Temporal I y II Regiones 2 y 3 de Julio 2002*, Santiago, Chile: Departamento de Protección Civil.
- ONEMI, 2013. *Alertas*, Santiago, Chile: s.n.
- ONU/EIRD, 2004. *Vivir con el Riesgo, Informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres*, s.l.: Versión en español 2004 en CD.
- ONU/EIRD, 2004. *Vivir con el Riesgo, Informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres, Versión en español 2004*, Nueva York: Organización de las Naciones Unidas.
- Ortega, J. & Garzón, G., 2006. *Interpretación de los depósitos de avenida como clave para establecer la dinámica de la llanura de inundación. Actas de la IX Reunión Nacional de Geomorfología, Universidad de Santiago de Compostela*, s.l.: s.n.
- Ortlieb, L., 1994. Las mayores precipitaciones históricas en Chile Central y la cronología de eventos ENOS en los siglos XVI-XIX. *Revista Chilena de Historia Natural*, Volumen 67, pp. 463-485.
- Ortlieb, L., 1994. Las mayores precipitaciones históricas en Chile Central y la cronología de eventos ENOS en los siglos XVI-XIX.. *Revista Chilena de Historia Natural*., Volumen 67, pp. 463-485.
- Padilla, H., 1981. *Contribución a la Geología y Petrología de las rocas volcánicas e intrusivas de los Andes Chilenos entre las latitudes 33°45' y 33°00'S.*, s.l.: Memoria de Título. Universidad de Chile, 329 p..
- Padilla, H. & Vergara, M., 1985. Control estructural y alteración tipo campo geotérmico en los intrusivos subvolcánicos Miocénicos del área Cuesta Chacabuco-Baños del Corazón, Chile Central.. *Revista Geológica de Chile.*, Issue 24, pp. 3-17.
- Pardo, M. y otros, 2002. The October 15, 1997 Punitaqui Earthquake (Mw = 7.1): A destructive event within the subducting Nazca Plate in central Chile. *Tectonophysics*, Volumen 345, pp. 199 - 210.
- Paskoff, R., 1970. *Le Chili semi-aride, recherches géomorphologiques*. Bordeaux: Biscaye, 420 pág.
- Pérez, A. y otros, 2014. Improving seismotectonics and seismic hazard assessment along the San Ramón Fault at the eastern border of Santiago city, Chile. *Natural Hazards*, Volumen 71, pp. 243-274.
- Pérez, C., 2005. *Cambio Climático: Vulnerabilidad, Adaptación y Rol Institucional. Estudio de casos en el Valle de Elqui.*, La Serena: Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Ambiental. Facultad de Ingeniería. Universidad de La Serena. 203 pág.
- Petit-Breuilh, M., 2001. *Desastres naturales y ocupación del territorio en hispanoamérica [Siglos XVI al XX]*., s.l.: Universidad de Huelva, Arias Montano (n.70): 341 p., il, Huelva. .
- Petit-Breuilh, M., 2003. *EL EFECTO DE LOS DESASTRES NATURALES EN LAS CIUDADES CHILENAS: SIGLOS XI AL XX.* Santiago: Sernageomin.
- Peyrat, S. y otros, 2006. Tarapacá intermediate-depth earthquake (Mw 7.7, 2005, northern Chile): A slab-pull event with horizontal fault plane constrained from seismologic and geodetic observations. *Geophys. Res. Lett.*, 33(L22308), pp. doi:10.1029/2006GL027710, 2006.
- Pierson, T. & Scott, K., 1985. Downstream dilution of Lahar: transition from debris flow to hyperconcentrated streamflow. *Water Research*, 21(10), pp. 1511-1524.

- Pineda, G. & Emparán, C., 2006. *Geología del Área Vicuña-Pichasca. Región de Coquimbo. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica No 97. Escala 1:100.000*, Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería.
- PMA, 2008. *Atlas de deformaciones cuaternarias de los Andes.*, s.l.: Publicación Geológica Internacional N°7, Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas. Servicio Nacional de Geología y Minería: 320 p. 1 Mapa en CD-ROM.
- PMA, 2008. *Atlas de deformaciones cuaternarias de los Andes. Publicación Geológica Internacional N°7.* s.l.:Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas. Servicio Nacional de Geología y Minería: 320 p. 1 Mapa en CD-ROM..
- PMA, 2008. *Proyecto Multinacional Andino. Geociencia para las Comunidades Andinas. Atlas de Deformaciones Cuaternarias de los Andes.* Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional, no. 7, 320 p., 1 CD-ROM..
- 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..
- PMA-GCA, 2008. Proyecto Multinacional Andino: Geociencia para las Comunidades Andinas. (PMA-GCA). *Atlas de deformaciones cuaternarias de los Andes. Servicio Nacional de Geología y Minería. Publicación Geológica Multinacional, 1 mapa en CD-ROM, Issue 7, p. 320.*
- Pye, K. & Tsoar, H., 2009. *Aeolian sand and sand dunes.* Berlin: Springer-Verlag. 462 p..
- Ramos, V. A., Cristallini, E. & Pérez, D. J., 2002. The Pampean flat-slab of the Central Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, Volumen 15, pp. 59-78.
- Ramos, V. A. y otros, 1986. Paleozoic Terranes of the Central Argentine-Chilean Andes. *Tectonics*, pp. 855-880.
- Rauld, R., 2002. *Análisis morfoestructural del frente cordillerano de Santiago oriente, entre el Río Mapocho y la Quebrada de Macul*, s.l.: Memoria de título de geólogo. Departamento de Geología. Universidad de Chile..
- Rauld, R., 2011. *Deformación cortical y peligro sísmico asociado a la falla San Ramón en el frente Cordillerano de Santiago, Chile Central (33°S)*. Santiago: Tesis de Doctorado en Ciencias, mención Geología. Departamento de Geología, Universidad de Chile..
- Rauld, R., 2011. *Deformación cortical y peligro sísmico asociado a la falla San Ramón en el frente cordillerano de Santiago, Chile Central (33°S)* , s.l.: Tesis para Doctor en Ciencias mención Geología. Universidad de Chile..
- Rauld, R. & Campos, J., 2002. *Análisis morfoestructural del frente cordillerano de Santiago oriente, entre el río Mapocho y la quebrada de Macul*, Santiago: Universidad de Chile.
- Reckendorf, F., 1998. *Geologic Hazards of development on sand dunes along the Oregon coast. En: Environmental, groundwater, and engineering geology: Applications from Oregon. (SWCES Publication N° 24).* s.l.:Burns, S., Southwest Washington Coastal Erosion Study. United States Geological Survey & Washington Department of Ecology.
- Rivano, G., Sepulveda, H., Boric, P. & Espiñeira, T., 1993. *Geología de las hojas Quillota y Portillo. Carta Geológica de Chile N° 73.*, Quillota y Portillo: Servicio Nacional de Geología y Minería..
- Rivano, S., 1996. *Geología de las Hojas Quillota y Portillo.*, s.l.: Servicio Nacional de Geología y Minería. Informe Inédito. 202 p..

- Rivano, S., Godoy, E. & Vergara, M. & V. R., 1990. Redefinición de la Formación Farellones en la cordillera de los Andes de Chile Central (32-34°S).. *Revista Geológica de Chile.*, 17(2), pp. 205-214.
- Rivano, S. & Sepulveda, P., 1991. *Hoja Illapel, Región de Coquimbo. Carta Geológica de Chile, 69.*, Santiago.: Servicio Nacional de Geología Y Minería.
- Rivano, S., Sepulveda, P., Boric, R. & Espineira, D., 1993. *Geología del Área Quillota-Portillo. N°73*, Santiago: Sernageomin.
- Rivano, S., Sepulveda, P., Boric, R. & Espineira, D., 1984. *Hojas de Quillota y portillo. Carta Geológica N° 73 escala 1:250.000*, Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería..
- Rivano, S., Sepúlveda, P., Boric, R. & Hervé, M. & P. A., 1986. Antecedentes radiométricos para una edad Cretácica Inferior de la Formación Las Chilcas.. *Revista Geológica de Chile.*, Issue 27, pp. 27-32.
- Rivano, S., Sepulveda, P. & Boric, R. y. E. D., 1993. *Mapa Geológico de las Hojas de Quillota y portillo. Carta Geológica N° 73 escala 1:250.000*, s.l.: Servicio Nacional de Geología y Minería. En prensa..
- Rivano, S. S. P., 1991. *Hoja Illapel, Región de Coquimbo. Carta Geológica N°69, escala 1:250.000.*, s.l.: Servicio Nacional de Geología y Minería..
- Ruegg, J. y otros, 2009. Interseismic strain accumulation measured by GPS in the seismic gap between Constitución and Concepción in Chile. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Issue 175, pp. 78-85.
- 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.
- Secretaría Regional de Vivienda y Urbanismo, IV Región, 2008. *Plan Regulador Comunal de Coquimbo. Centros urbanos de Coquimbo, Guanaqueros, Tongoy y Puerto Aldea*, Coquimbo: s.n.
- Sellés, D. & Gana, P., 2001. 9. *Geología del Área Talagante-San Francisco de Mostazal, Regiones Metropolitana del Lib. General Bernardo O'Higgins. Escala 1:100.000. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica N°74...* s.l.:s.n.
- 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. & Serey, A., 2009. Tsunamigenic, earthquake-triggered rock slope failures during the 21st of April 2007 Aisén earthquake, Southern Chile (45.5°S).. *Andean Geology*, 36(1), pp. 131-136..
- Sepúlveda, S. & Serey, A., 2009. Tsunamigenic, earthquake-triggered rock slope failures during the April 21, 2007 Aisén earthquake, southern Chile (45.5°S). *Andean Geology*, 26(1), pp. 131-136.
- 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. Publicación Geológica Digital, N°4.*, Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería..

- SERNAGEOMIN, 2015. *Efectos geológicos del evento meteorológico del 24, 25 y 26 de marzo de 2015: Efectos del aluvión 26-29 de marzo de 2015 en poblado de Sierra Gorda, II Región de Antofagasta*, Santiago, Chile: Subdirección de Geología, Servicio Nacional de Geología y Minería.
- SHOA, 2012. *Tocopilla. Carta de Inundación por Tsunami referida al año 1877*. 2da Edición ed. Valparaíso, Chile: Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada.
- 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. y otros, 1984. *Petrochemistry and age of rhyolitic pyroclastic flows which occur along the drainage valleys of the Río Maipo and Río Cachapoal (Chile) Yaucha and Río Papagayos (Argentina)*. *Revista Geológica de Chile*, No.23, p. 39-52., s.l.: s.n.
- Stern, C. y otros, 1994. Petrochemistry and age of rhyolitic pyroclastic flows which occur along the drainage valleys of the rio Maipo and rio Cachapoal (Chile) and rio Yaucha and rio Papagayos (Argentina). *Revista Geológica de Chile*, Issue 23, pp. 39-52.
- Suárez, G. & Comte, D., 1993. Comment on "Seismic coupling along the Chilean subduction zone" by B.W. Tichelaar and L.R. Ruff. *Journal of Geophysical Research*, Volumen 98, pp. 15825-15828.
- SUBDERE, 2011. *Guía Análisis de Riesgos Naturales para el Ordenamiento Territorial*, Santiago: Subsecretaría de Desarrollo Regional.
- Tassara, A. G. H.-J. S. S. & H. R., 2006. Three dimensional density model of the Nazca plate and the Andean continental margin.. *Journal of Geophysical Research*, 111(B9), p. B09404..
- Tassara, A. G. H.-J. S. 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..
- 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.
- 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*, Volumen 111.
- Thiele, R., 1980. *Hoja Santiago, región Metropolitana. Carta Geológica N°29, escala 1:250.000.*, s.l.: Servicio Nacional de Geología y Minería..
- Thomas, A., 1967. *Cuadrangulo Mamiña, Provincia de Tarapacá, Carta Geológica de Chile, escala 1:50000*, Santiago: Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Thomas, A., 1967. *Cuadrangulo Mamiña, Provincia de Tarapacá, Carta Geológica de Chile, escala 1:50000*, Santiago: Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Thomas, H., 1958. *Geología de la Cordillera de la Costa entre el valle de La Ligua y la cuesta de Barriga*. Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín, No. 2, 86 p, 2 mapas escala 1: 150.000, Santiago., s.l.: s.n.
- Tichelaar, B. W. & Ruff, L. J., 1993. *Depth of seismic coupling along subduction zones*, *Jour. Geoph. Res.*, 98, pp. 2017-2037., s.l.: s.n.

- 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.
- Urrutia, R. & Lanza, C., 1993. *Catástrofes en Chile 1541 - 1992*. Santiago: La Noria. 440 pp..
- USGS, 2008. *The landslide handbook—A guide to understanding landslides*, Reston, Virginia: U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 p..
- Varela, J., 1921. *Reseña histórica del valle de Elqui.*, La Serena: Imprenta Moderna.
- Vargas, G., Ortlieb, L. & Rutllant, J., 2000. Aluviones históricos en Antofagasta y su relación con eventos El Niño/Oscilación del Sur. *Rev. Geol. Chile*, Dic., v.27(n.2), pp. <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-02082000000200002>.
- 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.
- Vergara, M. D. R., 1979. Edades K/Ar en secuencias volcánicas continentales postneocomianas de Chile Central; su depositación en cuencas intermontañas restringidas.. *Asociación Geológica Argentina.*, Issue XXXIV, pp. 42-45.
- Vigny, C. y otros, 2009. Upper Plate deformation measured by GPS in the Coquimbo Gap, Chile. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Volumen 175, pp. 86 - 95.
- Wall, R., Gana, P. & Gutiérrez, A., 1996. *Mapa geológico del área de San Antonio-Melipilla, Regiones de Valparaíso, Metropolitana y del Libertador General Bernardo O'Higgins*. Servicio Nacional de Geología y Minería. *Mapas Geológicos, No. 2, 1 mapa 1: 100.000, 1 anexo, Santiago.*, s.l.: s.n.
- Wall, R., Selles, D. & Gana, P., 1999. *Área Til Til – Santiago, Región Metropolitana. Mapa geológico N°11, mapa escala 1:100.000, Santiago.*, s.l.: SERNAGEOMIN. .
- Watt, S., Pyle, D., Naranjo, J. & Mather, T., 2009. Landslide and tsunami hazard at Yate volcano, Chile as an example of edifice destruction on strike-slip fault zones. *Bulletin of Volcanology*, 71(5), pp. 559-574.
- 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].
- Wiegel, R., 1970. Tsunamis. En: Wiegel et al., ed. *Earthquake Engineering*. Engelwood Cliffs: Prentice Hall, pp. 253-306.
- Wiegel, R., 1970. Tsunamis. In: En: *Earthquake Engineering*. Engelwood Cliffs, N. J.: Prentice Hall., N.J., pp. 253-306.
- Zuñiga et al., 2007. *Pudahuel. En el Camino de la Memoria*. Santiago: Municipalidad de Pudahuel.

ANEXOS

ANEXO A Definiciones de Peligro y Riesgo usadas en este informe

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. Se entiende como **Peligro Natural** a cualquier fenómeno de origen natural que puede tener efectos negativos en el territorio (personas, infraestructura, medio ambiente, etc.). Los peligros naturales pueden subdividirse en distintas categorías: geológicos, hidrológicos, climáticos, incendios, etc.

Asociados a los peligros naturales se reconocen cuatro conceptos principales: **susceptibilidad**, **vulnerabilidad**, **amenaza** o peligrosidad (hazard) y **riesgo** (risk).

La **susceptibilidad** corresponde a una estimación cualitativa o cuantitativa de la distribución espacial de un fenómeno dado que existe o que potencialmente podría ocurrir en un área. Aunque se espera que un cierto fenómeno peligroso ocurra con mayor frecuencia en las áreas de mayor susceptibilidad, debe tenerse en cuenta que el análisis de susceptibilidad no considera el período de retorno de los eventos, es decir, el factor tiempo (JTC-1, 2008). La susceptibilidad depende directamente de los factores que controlan o condicionan la ocurrencia de los procesos, como la geomorfología o factores intrínsecos de los materiales geológicos, y de factores externos que pueden actuar como desencadenantes (por ejemplo precipitaciones intensas, sismos, etc.). Para la construcción de mapas de susceptibilidad se utilizan los mapas de inventario, en los que se identifican las áreas que han sido afectadas por 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.

El concepto de **amenaza** o **peligrosidad** (hazard*) corresponde a la probabilidad de ocurrencia de un proceso, con una magnitud determinada dentro de cierto período de tiempo y en un área específica (Varnes, 1984). La estimación de la amenaza o peligrosidad implica necesariamente una consideración de la variable temporal, es decir, el período de recurrencia de un evento (período de retorno). Por otro lado, la amenaza para períodos de retorno infinitos tiende a ser similar que la susceptibilidad. Por lo anterior, cuando no se cuenta con datos suficientes para estimar períodos de retorno, resultan útiles los mapas de susceptibilidad, que consideran solo las variables intrínsecas del material para la zonificación de peligros geológicos.

Los **elementos expuestos** pueden ser personas, bienes, propiedades, infraestructuras, servicios, actividades económicas, etc., que pueden sufrir las consecuencias directas o indirectas de un proceso geológico en una determinada zona (Gonzalez de Vallejo, et al., 2002).

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

La **vulnerabilidad** corresponde al grado de pérdidas o daños potenciales de un elemento o conjunto de elementos dados, como consecuencia de la ocurrencia de un fenómeno de magnitud determinada. Se expresa en una escala de 0 (sin daños) a 1 (pérdida o destrucción total del elemento) o entre 0% y 100% de daños (Varnes, (1984); González de Vallejo et al., (2002); JTC1, (2008)).

Por otro lado, el concepto de **riesgo** (risk) incorpora consideraciones socio-económicas, y se define como las potenciales pérdidas debidas a un fenómeno natural determinado, por ejemplo vidas humanas, pérdidas económicas directas o indirectas, daños en infraestructura, etc. (Gonzalez de Vallejo, et al., 2002).

Según Varnes (1984), se denomina riesgo específico al grado de pérdidas esperado durante un período de tiempo dado, como consecuencia de la ocurrencia de un determinado proceso, expresado en términos de probabilidad. Puede ser expresado como el producto $A \times V$, donde A corresponde a la amenaza y V a la vulnerabilidad. En este caso no es posible obtener una evaluación cuantitativa de las pérdidas (Gonzalez de Vallejo, et al., 2002).

De acuerdo a las definiciones de la UNESCO (Varnes, 1984) el riesgo total corresponde al número esperado de vidas, personas heridas, daños a la propiedad, o a las actividades económicas debido a un fenómeno natural específico y se expresa como el producto del riesgo específico y los elementos expuestos, esto es:

$$R_t = R_e \times E = A \times V \times E$$

Donde R_t corresponde al riesgo total, R_e al riesgo específico y E a los elementos expuestos considerados.

La definición de riesgo, o áreas de riesgo, utilizadas internacionalmente difieren a la nomenclatura propuesta por la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción en su artículo 2.1.17. En la OGUC, el concepto utilizado de riesgo corresponde a la definición de "Peligro Natural" definida internacionalmente.

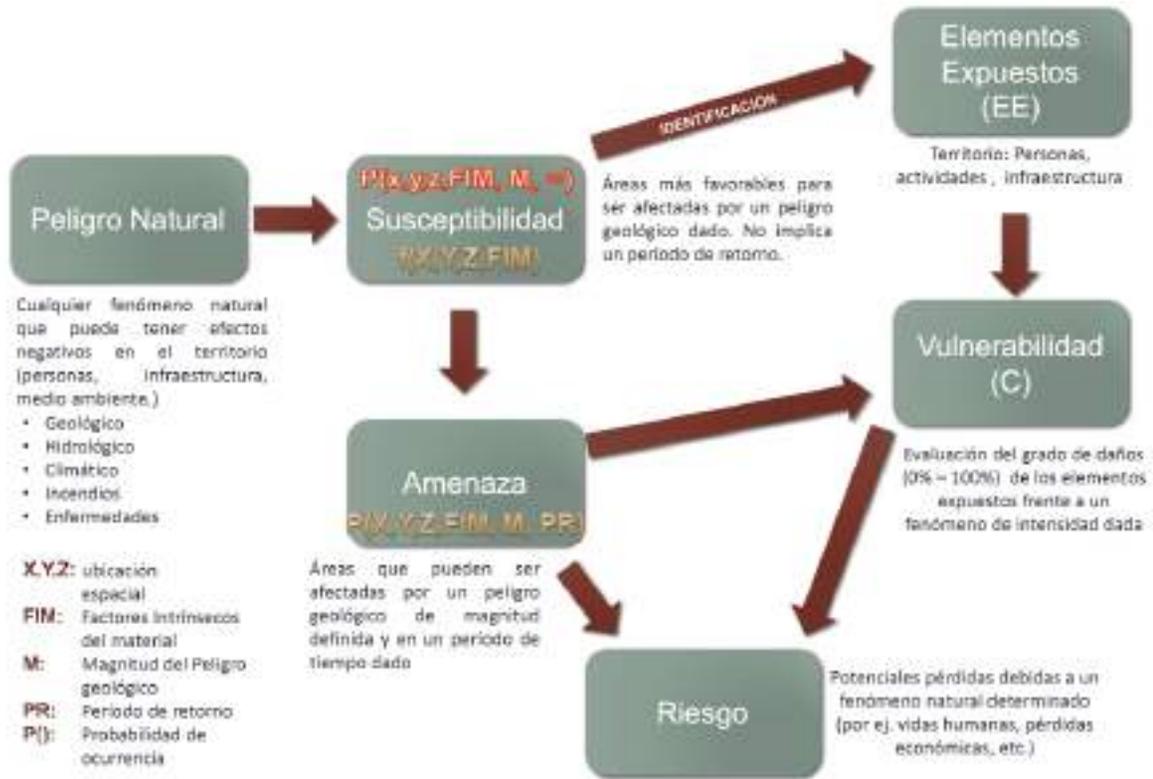
En resumen, los peligros geológicos pueden analizarse desde el punto de vista de las condiciones intrínsecas del material (estudios de susceptibilidad o determinísticos) y desde el punto de vista de los factores desencadenantes de un fenómeno (estudios de amenaza o probabilísticos). Considerando que 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 adecuado para 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 (ONU/EIRD, 2004).

Es importante destacar que las definiciones previamente presentadas corresponden a una terminología aceptada y utilizada a nivel internacional, tanto en el ámbito científico (ver por ejemplo JTC-1, (2008)) como en instituciones públicas de diversos países. Estas definiciones son usadas por la Estrategia Internacional para la reducción de Desastres de la ONU (ONU/EIRD, 2004), por UNESCO (ver por ejemplo Varnes, (1984)) y por los servicios geológicos de diversos países (ver por ejemplo USGS, (2008) y PMA-GCA (2007)). A nivel nacional, estas definiciones han sido adoptadas por la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo en la “Guía Análisis de Riesgos Naturales para el Ordenamiento Territorial” (SUBDERE, 2011) y por el Servicio Nacional de Geología y Minería (ver por ejemplo PMA-GCA (2007)).

Se recomienda incorporar esta terminología en el ejercicio de los instrumentos de planificación territorial, lo que permitirá que exista concordancia en la terminología y las metodologías adoptadas, tanto a nivel nacional, entre los diferentes servicios públicos relacionados, como a nivel internacional.

FIGURA A-8-1 Etapas de la evaluación de un evento geológico peligroso



Fuente: Elaboración propia basado en Varnes (1984)

A.1 Referencias

González de Vallejo, L., Ferrer, M, Ortuño, L., Oteo, C. 2002. Ingeniería Geológica. Pearson Education, Madrid. 744 pp.

JTC-1, 2008. Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes, 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning, for land use planning. Engineering Geology 103, 85–98.

Ogura, A., Soares Macedo, E., 2000. Procesos y Riesgos Geológicos. En: II Curso Internacional de Aspectos Geológicos de Protección Ambiental (UNESCO y UNICAMP). Campinas, Brasil, 345 p. Disponible en: <http://unesdoc.unesco.org/images/001VI/001VI31/1VI3153s.pdf>

ONU/EIRD, 2004, Vivir con el Riesgo, Informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres, Versión en español 2004 en CD.

Urrutia, R. y Lanza, C. 1993. Catástrofes en Chile 1541-1992. Editorial La Noria. 440p. Facultad de Ingeniería, Universidad de Chile. Santiago, Chile.

Varnes, D.J., 1984. Hazard Zonation: A Review of Principal and Practice. Commission of Landslide of IAEG, UNESCO, Natural Hazades, No.3, 61 p

González de Vallejo, L., Ferrer, M, Ortuño, L., Oteo, C. 2002. Ingeniería Geológica. Pearson Education, Madrid. 744 pp.

JTC-1, 2008. Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes, 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning, for land use planning. Engineering Geology 103, 85–98.

Ogura, A., Soares Macedo, E., 2000. Procesos y Riesgos Geológicos. En: II Curso Internacional de Aspectos Geológicos de Protección Ambiental (UNESCO y UNICAMP). Campinas, Brasil, 345 p. Disponible en: <http://unesdoc.unesco.org/images/001VI/001VI31/1VI3153s.pdf>

ONU/EIRD, 2004, Vivir con el Riesgo, Informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres, Versión en español 2004 en CD.

Urrutia, R. y Lanza, C. 1993. Catástrofes en Chile 1541-1992. Editorial La Noria. 440p. Facultad de Ingeniería, Universidad de Chile. Santiago, Chile.

Varnes, D.J., 1984. Hazard Zonation: A Review of Principal and Practice. Commission of Landslide of IAEG, UNESCO, Natural Hazades, No.3,61 p

ANEXO B Descripción Peligros Geológicos Analizados

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.

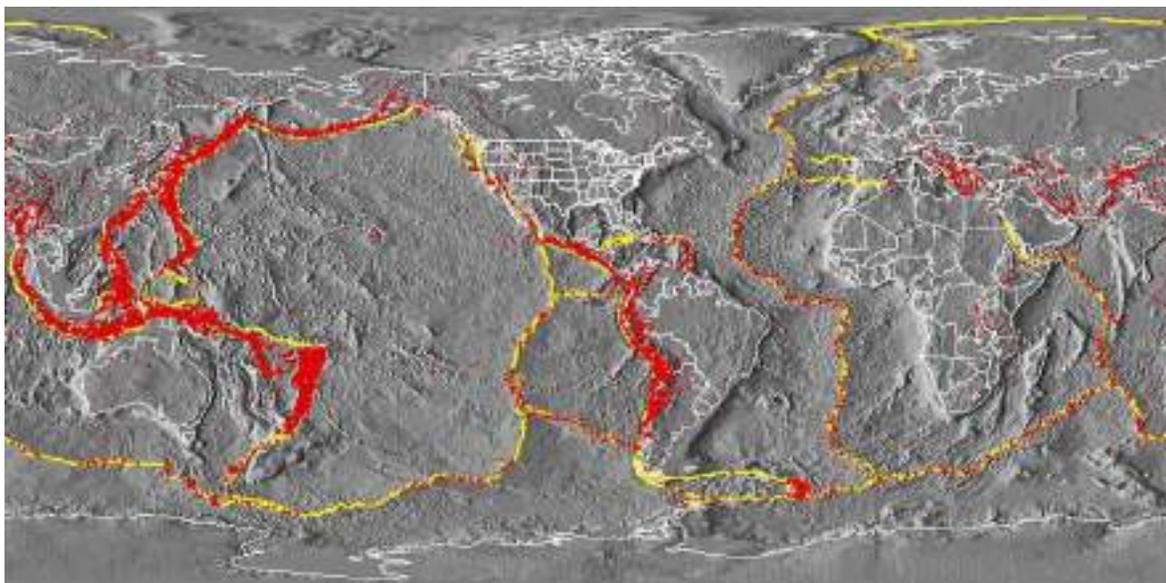
Para cada peligro, se describe en qué consiste, cuáles son sus factores condicionantes, y los principales efectos para la población y sus actividades. El análisis se realiza dividiendo los peligros geológicos en dos grupos, procesos internos o endógenos de la tierra (peligro sísmico y volcánico), y los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

A.2 Procesos Internos o Endógenos de la Tierra

A.2.1 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 B- 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.

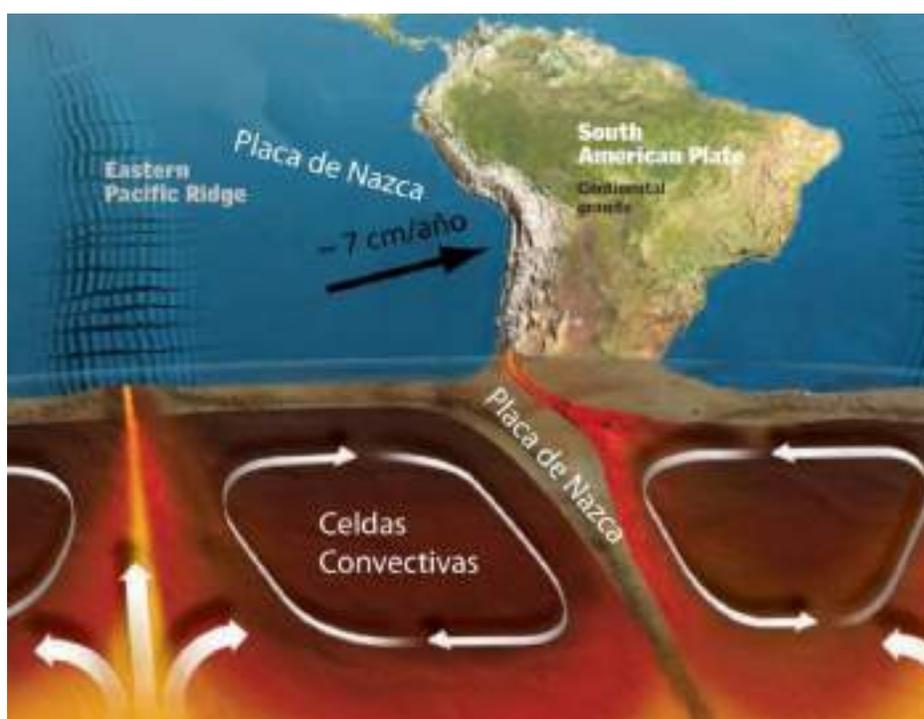
FIGURA B-1 Sismicidad mundial entre los años 1980 y 1990, se representan en puntos rojos los epicentros con magnitud >5. Nótese como la sismicidad “ilumina” los límites de las placas tectónicas, dibujados en amarillo



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 B-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 B-2 Contexto geodinámico y margen de subducción de Chile



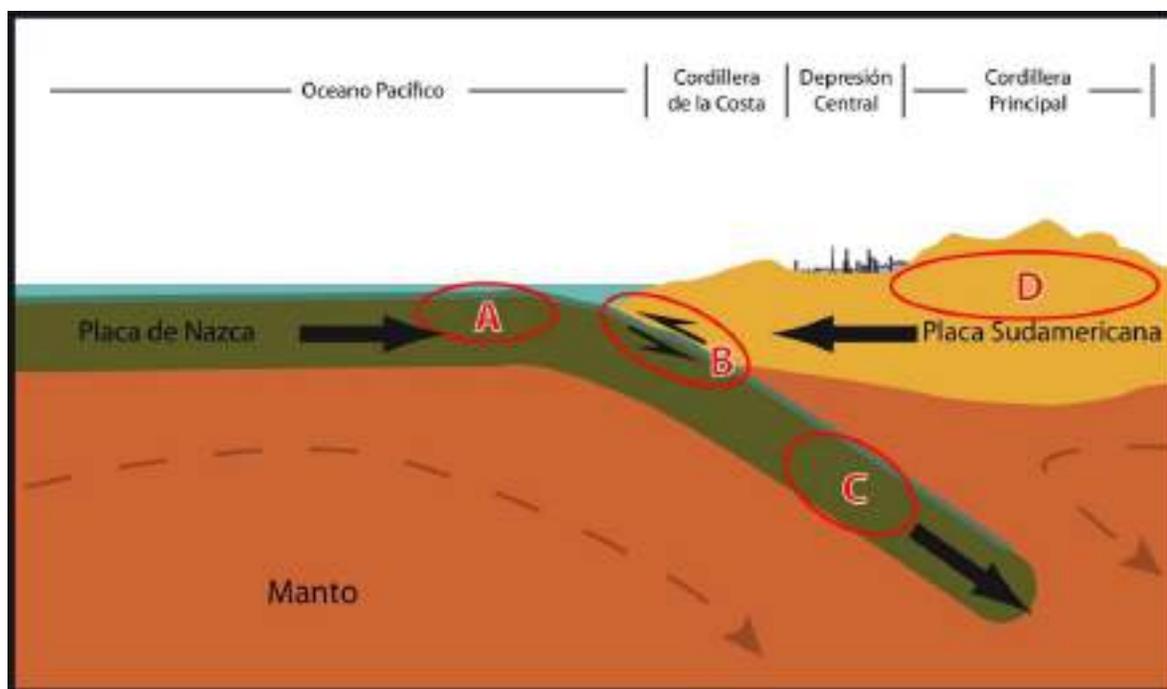
Fuente: Modificado de Enciclopedia Britannica (2008).

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, que corresponde a:

- 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.

- 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.
- 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).
- Zona D: Sismos superficiales intraplaca, como 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 B-3 Tipos de sismos que ocurren en un margen de subducción (explicación en el texto)

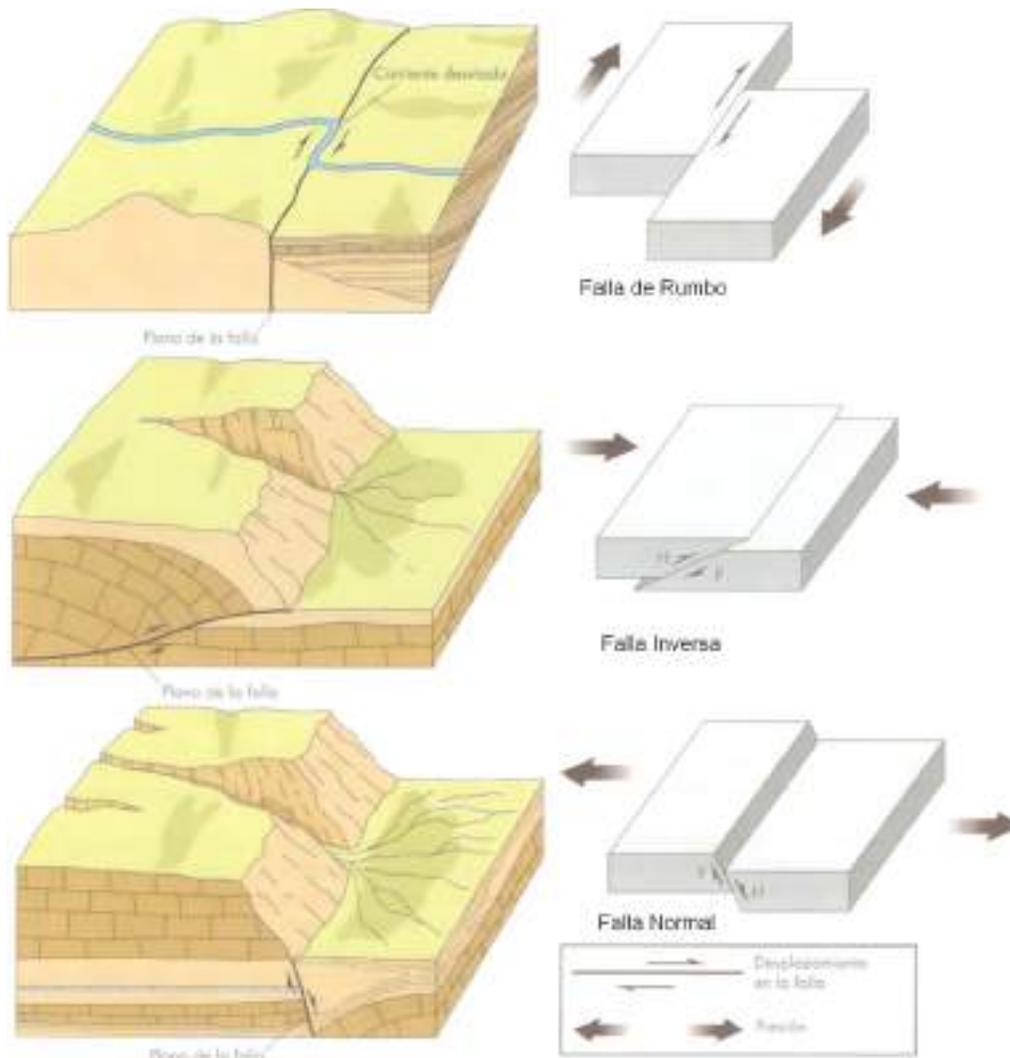


Fuente: Elaboración propia.

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. 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). 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 B-4 Tipos de Falla y esfuerzos asociados

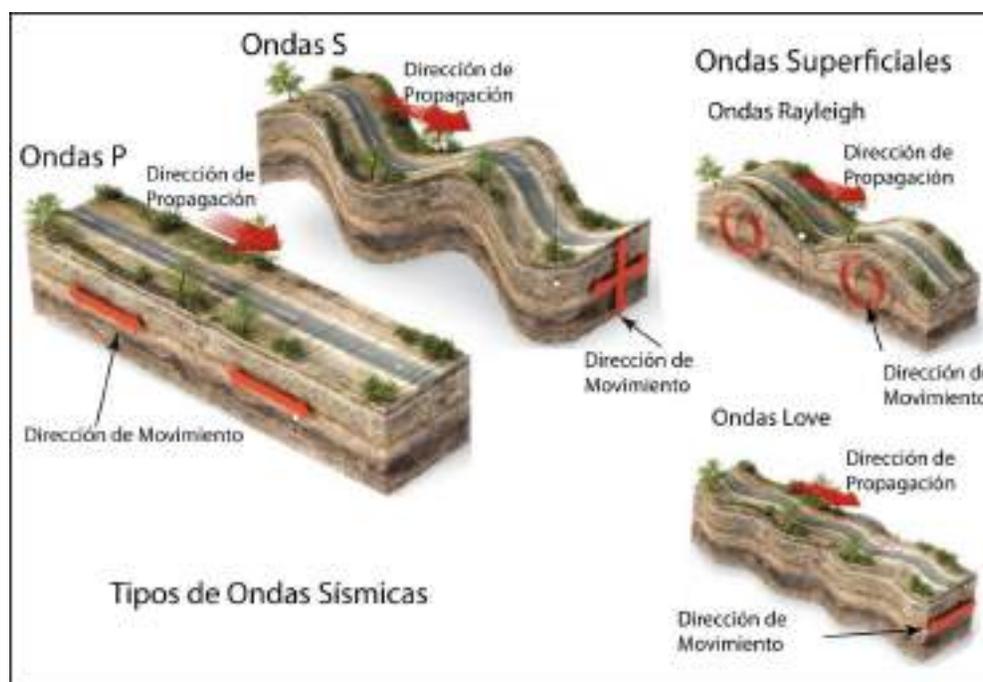


Fuente: Keller y Blodgett (2004).

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 B-5 Tipos de ondas sísmicas



Fuente: Modificado de Enciclopedia Britannica (2008).

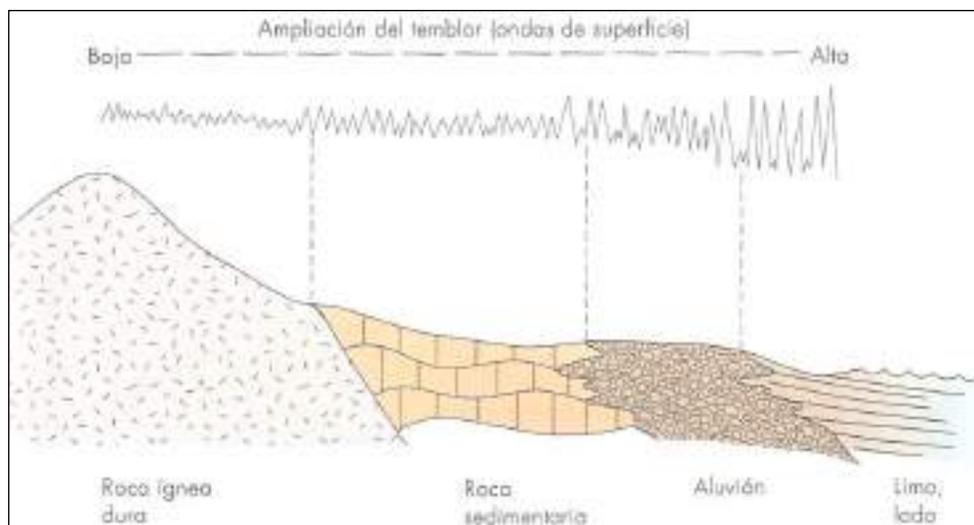
El principal efecto asociado a la ocurrencia de sismos son fuertes movimientos del terreno, que originan un peligro directo sobre las estructuras y sobre las personas, debido a las fuertes aceleraciones generadas por las ondas sísmicas. Sumado a lo anterior, la ocurrencia de estos fenómenos es generalmente 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 innumerables efectos adversos para la sociedad que provocan este tipo de fenómenos.

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); (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)).

FIGURA B-6 Amplificación de la vibración generada por un terremoto



Fuente: Keller y Blodgett (2004).

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.

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):

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.

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.

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.

A.2.2 *Volcanismo*

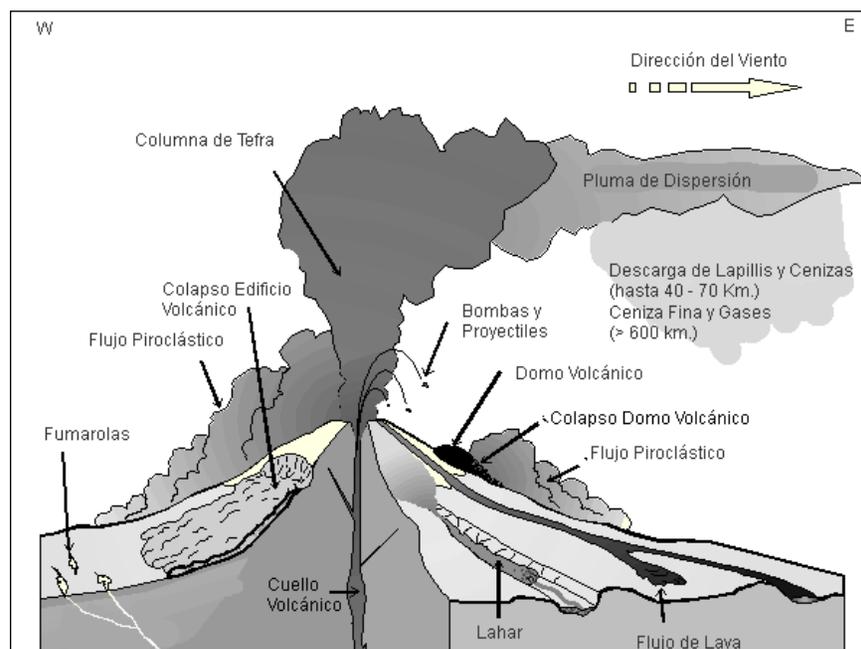
El peligro volcánico deriva de los procesos asociados a la erupción de un volcán. En Chile el volcanismo activo se distribuye a lo largo de la Cordillera de los Andes, pero de forma discontinua. En la zona entre los 18° y 27°S y aquella al sur de los 33°S se ubica el volcanismo activo, mientras que entre los 27°-33°S está ausente.

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.

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.

FIGURA B-7 Peligros volcánicos asociados a la erupción de un volcán



Fuente: Myers y Brantley (1995).

CUADRO B-1 Peligros asociados al volcanismo

Peligro	Factores de Peligro	Tipo de Daño	Alcance	Condicionantes
Lluvia de Tefra y Proyectiles Balísticos	Proyección de Bombas y Escorias Incandescentes	Daños por impacto, incendios.	Alrededores del volcán (<10 km)	Tamaño de proyectiles. Mayor tamaño, menor alcance; menor tamaño, mayor alcance
	Caída de Piroclastos y Dispersión de Cenizas	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
	Flujos y Oleadas Piroclásticas	Daños a estructuras, incendios, recubrimiento por cenizas.	Decenas a centenares de kilómetros	Dirección del viento y hacia donde colapsa la columna de tefra
	Gases	Envenenamiento, contaminación aire y agua.	Decenas a centenares de kilómetros	Dirección del viento y hacia donde colapsa la columna de tefra
	Inyección de Aerosoles a la Estratósfera	Impacto en el clima, efecto a largo plazo y/o a distancia.		Dirección del viento
Lavas y Edificio Volcánico	Lavas y Domos	Daño a estructuras, incendios, recubrimiento por lavas.	Alrededores del volcán (<10 km)	
	Deformación del Terreno	Fallas, daños a estructuras.	Alrededores del volcán (<10 km), puede ser de cientos de kilómetros	

Peligro	Factores de Peligro	Tipo de Daño	Alcance	Condicionantes
	Terremotos y Temblores Volcánicos	Colapso del edificio volcánico, remociones en masa, daños a estructuras.	Alrededores del volcán (<10 km), puede ser de cientos de kilómetros	Geomorfología
	Lahares	Daños a estructuras, arrastres de materiales, recubrimiento por barros.	Decenas a centenares de kilómetros	Red de drenaje
Remociones en masa	Colapso Parcial o Total del Edificio volcánico	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
	Deslizamiento de Laderas	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
	Ondas de Choque	Rotura de cristales y paneles.	Decenas de kilómetros	Dirección del viento y geomorfología
Otros	Variaciones en el Sistema Geotérmico de Acuíferos	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).

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.

A.3 Procesos Exógenos o Externos de la Tierra

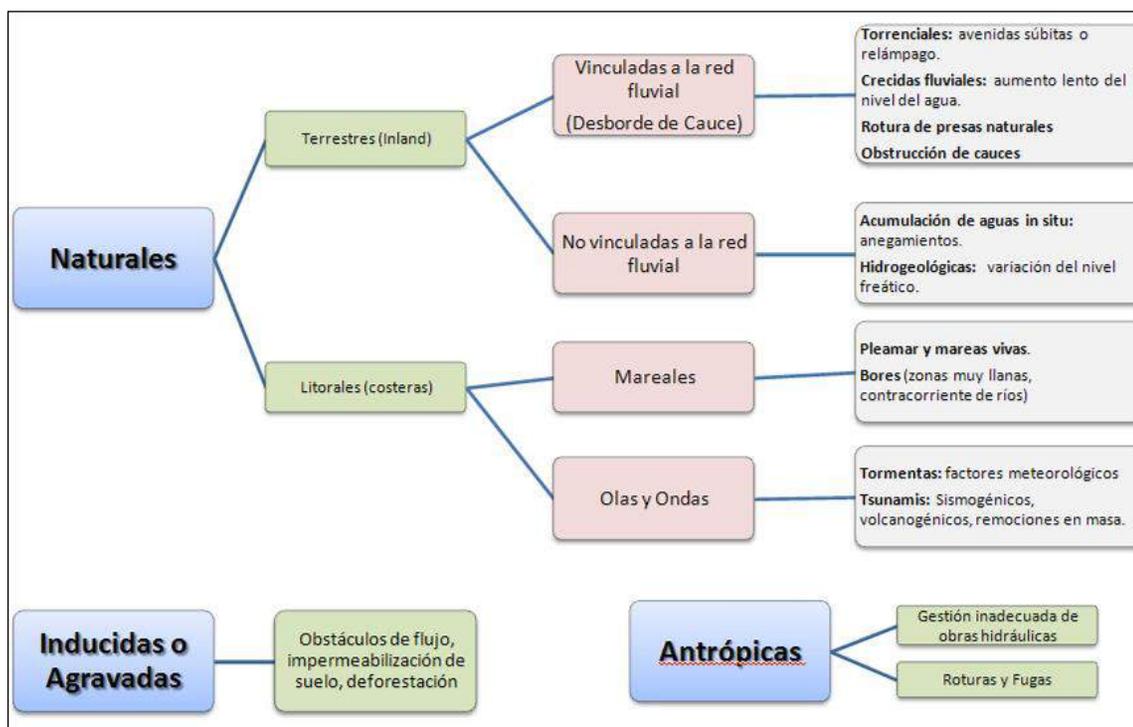
A.3.1 Inundaciones Terrestres y Litorales

Las inundaciones, sin considerar aquellas generadas por causas antrópicas, pueden ser de dos tipos (FIGURA): (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.

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

FIGURA B-8 Clasificación de los tipos de inundaciones



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

A.3.1.1 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.

A.3.1.2 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.

A.3.1.3 Inundación Costeras asociadas a maremotos

Los tsunamis o maremotos 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. Se conocen tres orígenes posibles:

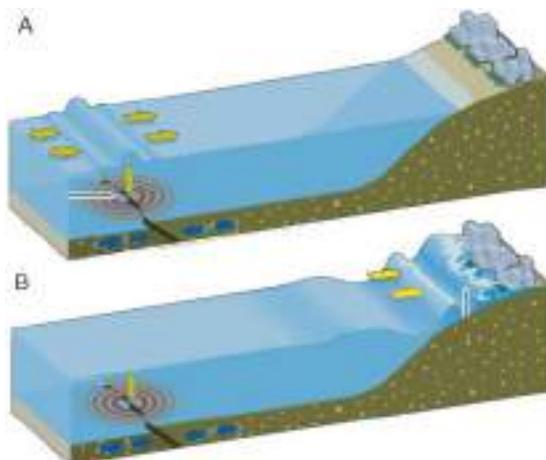
Maremotos generados producto de un sismo mayor: durante un terremoto se genera una rápida elevación o hundimiento del fondo marino, provocando un gran movimiento vertical de agua que es propagado en forma de olas que se alejan radialmente desde la zona de ruptura, movimiento que puede considerarse lineal (FIGURA). A diferencia de las olas generadas por el viento, en las cuales las partículas tienen un movimiento circular ondulante, las olas generadas por un maremoto fluyen en línea recta hacia adelante (FIGURA).

Se pueden definir dos tipos de maremotos: (1) los de “origen cercano”, donde la población siente el terremoto que generará el maremoto, y (2) los de “origen lejano”, donde la población no es alertada por un movimiento sísmico previo al arribo del maremoto. Se debe recalcar que, aun cuando los maremotos están generalmente relacionados a sismos de magnitud mayor a 8.0° con un epicentro bajo la superficie marina ésta no es la única forma de generación de este tipo de fenómenos.

Maremotos generados por erupción volcánica submarina: Se producen por erupciones volcánicas submarinas, las que generan un pulso de agua vertical que es disipado en forma de olas (FIGURA). Cómo la generación es puntual, la energía liberada es menor a la generada por sismos.

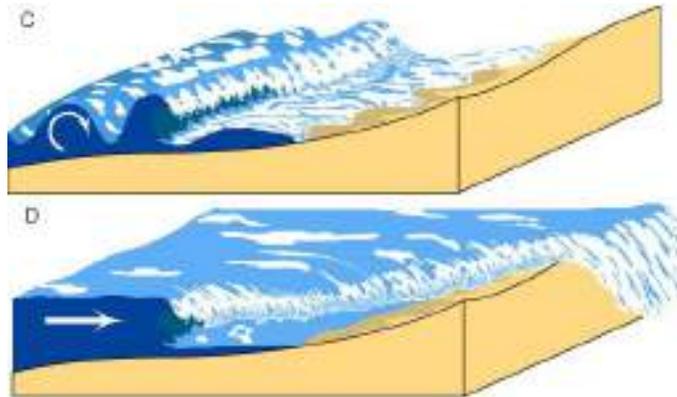
Maremotos generados por deslizamientos: Corresponden a deslizamientos submarinos o superficiales, que generan perturbaciones en el nivel del mar o en lagos (FIGURA). Ejemplos de este tipo se han registrado en el fiordo de Aysén asociado al ciclo sísmico desarrollado durante abril de 2007 (Sepúlveda & Serey, 2009).

FIGURA B-9 Mecanismo de formación de un maremoto asociado a un terremoto cuyo epicentro es submarino. A. Sismo genera un pulso vertical que mueve las aguas superficiales. B. Corresponde al momento en que arriba la onda a las costas



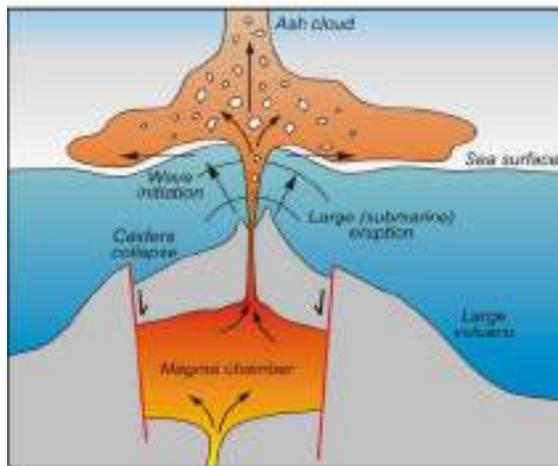
Fuente: Modificado de Keller y Blodgett, (2004)

FIGURA B-10 Comparación entre olas generadas por el viento (c) y el frente de olas de un maremoto (d)



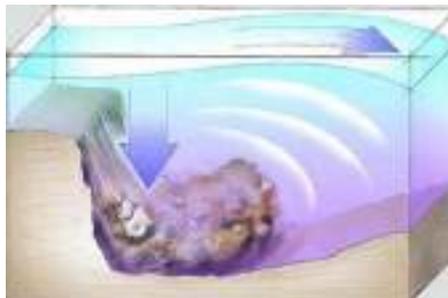
Fuente: Modificado de Department of Earth and Space Sciences, University of Washington, en <http://www.ess.washington.edu/tsunami/images/tsulg.jpg>

FIGURA B-11 Mecanismo de generación de maremotos por erupciones volcánicas submarinas



Fuente: Tomado de Natural Resources of Canadá, de http://atlas.nrcan.gc.ca/auth/english/maps/environment/naturalhazards/tsunami/fig4_tsunami_volcano_eruption.jpg

FIGURA B-12 Mecanismo de generación de maremotos asociado a deslizamientos



Fuente: Tomado de Universidad de Santa Cruz, California. <http://scicom.ucsc.edu/scinotes/9901/kill/images/slidesfinal.jpg>

La propagación del frente de ondas del maremoto se produce superficial y concéntricamente, similar al efecto en la superficie de un estanque de agua al lanzar una piedra. En aguas abiertas, la altura de la ola es casi imperceptible (menores a un metro) y se desplaza a velocidades que llegan a los 800 km/h, pero esta velocidad disminuye a menos de 60 km/h al acercarse las olas al continente transformando así la energía cinética (velocidad) en energía potencial (altura de ola). La altura máxima de la ola (medido sobre el nivel medio del mar) y su penetración en el continente estará condicionada por la distancia al epicentro del terremoto, así como también por la morfología, pendiente y profundidad del fondo marino, pudiendo alcanzar hasta 30 metros de elevación sobre el nivel del mar en el continente.

Aun cuando la mayoría de los maremotos son generados por sismos, su impacto e intensidad están determinados en primer lugar por la topografía submarina del sitio donde se produce el sismo (por ejemplo, profundidad y consistencia del suelo marino). De esta forma, según los estudios científicos, se sabe que ante un temblor de epicentro poco profundo y cuya intensidad sea inferior a los 6.4 grados en la escala de Richter, existen pocas probabilidades de que se genere un maremoto. Aquellos con magnitudes superiores a los 7.5 grados son los principales causantes de maremotos de alto riesgo.

Dadas estas características, es preciso señalar que los maremotos son muy frecuentes en el Océano Pacífico, pues el margen de su cuenca oceánica se distribuyen alberga en conjunto una de las zonas con mayor actividad sísmica en el planeta: el Cinturón de Fuego del Pacífico. Basta decir que por ejemplo, entre los años de 1900 y 1986, fueron registrados en esta cuenca 247 maremotos de los cuales 29% incidieron en las costas japonesas.

Se han definido diversas escalas para medir la magnitud e intensidad de los maremotos. Una de las más conocidas es la escala Inamura (1942, 1949) que en función de la altura de las olas y los daños que estas producen en la costa clasifica el impacto y la intensidad de estos fenómenos, de manera similar a la medición de la Escala de Mercalli de los eventos sísmicos.

CUADRO B-2 Escala de grados de maremotos según Inamura (1942, 1949)

Grado de maremotos m	Altura de la ola H (en metros)	Descripción de los daños
0	1-2	No produce daños.
1	2-5	Casas inundadas y botes destruidos son arrastrados.
2	5-10	Hombres, barcos y casas son barridos.
3	10-20	Daños extendidos a lo largo de 400km de la costa.
4	>30	Daños extendidos sobre más de 500km a lo largo de la línea costera.

Fuente: Inamura (1942) e Inamura (1949)

Posteriormente, lida (1963) relacionó la energía liberada por un terremoto con la energía del maremoto asociado, estimando el desplazamiento vertical de agua de este último. Esta metodología en, en términos generales, análoga a la escala de Richter (que mide la magnitud del sismo) con la energía del maremoto. Por último, Wiegel (1970) combinó las escalas de Inamura e lida con lo cual logró identificar y diferenciar con mayor claridad la magnitud de un maremoto.

CUADRO B-3 Escala de grados de maremoto según lida (1963)

Grado de maremoto m	Energía (Erg) x 10²³	Máxima altura de inundación R (metros)
5.0	25.6	> 32
4.5	12.8	24 - 32
4.0	6.4	16 - 24
3.5	3.2	12 - 16
3.0	1.6	8 - 12
2.5	0.8	6 - 8
2.0	0.4	4 - 6
1.5	0.2	3 - 4
1.0	0.1	2 - 3
0.5	0.05	1.5 - 2
0.0	0.025	1 - 1.5
-0.5	0.0125	0.75 - 1
-1.0	0.006	0.50 - 0.75
-1.5	0.003	0.30 - 0.50
-2.0	0.0015	< 0.30

Fuente: lida (1963)

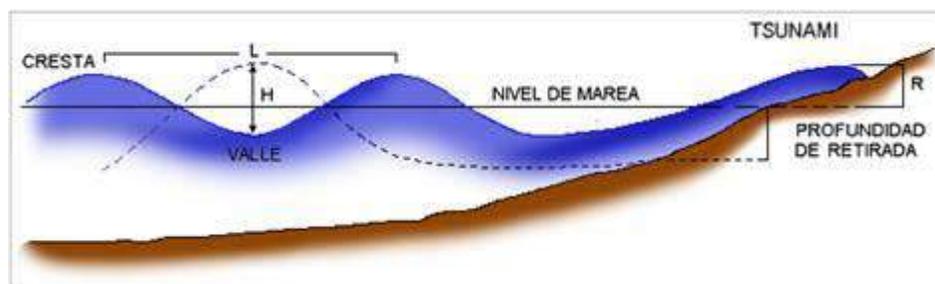
Los parámetros considerados por Wiegel (1970) son los siguientes (FIGURA): la altura de la ola (H) como la diferencia de nivel entre la cresta y el valle; altura máxima de inundación (R), corresponde al lugar de la costa donde los efectos del maremoto son mayores.

CUADRO B-4 Escala de grados de maremoto según Inamura e lida; transcrita por Wiegel (1970)

Grado maremoto m	Altura de la ola H (metros)	Altura máxima de inundación R (metros)	Descripción de los daños.
0	1 – 2	1 – 1.15	No produce daños.
1	2 – 5	2 – 3	Casas inundadas y botes destruidos son arrastrados.
2	5 – 10	4 – 6	Hombres, barcos y casas son barridos.
3	10 – 20	8 – 12	Daños extendidos a lo largo de 400km de la costa.
4	> 30	16 – 24	Daños extendidos sobre más de 500km a lo largo de la línea costera.

Fuente: Wiegel (1970)

FIGURA B-13 Elementos básicos considerados en la escala de Magnitud Inamura-lida definida por Wiegel



Fuente: Modificado de Wiegel (1970)

En resumen, los efectos de un maremoto a lo largo de una línea costera dependerán de la magnitud del sismo o manifestación que lo origina, la topografía del suelo marino a lo largo y ancho de la zona de propagación del maremoto (existencia de arrecifes, malecones, etc.), la distancia de la costa al epicentro, y la orientación y forma de la bahía afectada respecto al epicentro. Existen relaciones directas entre la magnitud del sismo y del maremoto: a mayor magnitud del sismo, mayor el tamaño de la ola. Sin embargo, de acuerdo a la morfología de la costa, la extensión de la inundación puede crecer o verse disminuida, variar en los tiempos de llegada a puerto, o simplemente perder energía y afectar a la costa con menor intensidad.

El daño en el continente será proporcional a población que habita y a la infraestructura presente en la zona afectada, y puede verse amplificado en aquellas zonas de la costa que actúan como concentradoras de la energía de maremotos, esto es, aquellos sectores con

líneas de costa que presenten cañones submarinos como la desembocadura de los grandes ríos hacia el mar y en bahías.

1. Tiempo de Aviso: Lamentablemente, el daño a la infraestructura es inevitable, pero puede salvarse una cantidad considerable de vidas si de alerta adecuadamente a la población.
 - 1.1. Maremoto de origen cercano: es de aproximadamente 15 minutos a una hora si el sismo fue percibido por la población, la que debe dirigirse hacia los sectores altos inmediatamente después de ocurrido el terremoto.
 - 1.2. Maremoto de origen lejano: el tiempo de aviso puede ser nulo si no se activa una alerta de maremoto de origen lejano, como el ejemplo presentado de la Península de Kamchatcka o los eventos ocurridos en el océano Índico durante el 2004.
2. La distancia al origen del maremoto, así como la morfología, pendiente y profundidad del fondo marino. En este sentido, científicos japoneses han determinado que a menor pendiente de la ola (relación entre altura y longitud de onda), mayor será la altura máxima de inundación. Por ello, una costa que presente una plataforma continental escalonada (como si fuera una gran escalera), reduce la energía cinética del maremoto y con ello sus potenciales riesgos; mientras que una línea costera con una plataforma continental de pendiente suave permite que la energía del maremoto sea recibida en su totalidad.
3. El daño será proporcional a la población y la infraestructura presente en la zona afectada y puede verse amplificado en aquellas zonas de la costa que actúan como concentradoras de la energía de maremotos, esto es, aquellos sectores con líneas de costa que presenten cañones submarinos, como la desembocadura de los grandes ríos hacia el mar y en bahías.

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.

A.3.2 *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. El movimiento de estos materiales puede ser por caída, volcamiento, deslizamiento, propagación lateral o flujo.

A.3.2.1 *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.

A.3.2.2 *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. 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. 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, exposición, 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.).

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.

FIGURA B-14 Clasificación de tipos de remoción en masa en relación al movimiento que lo origina y el material constituyente de la ladera

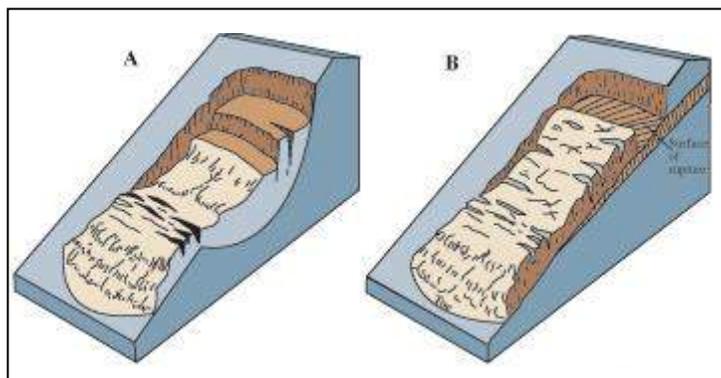
Material		ROCA	DETRITO	SUELO
Tipo de movimiento:				
CAIDA				
	VOLCAMIENTO			
DESPLAZAMIENTO	Rotacional			
	Traslacional (planar)			
PROPAGACION				
FLUJO				
COMPLEJO				

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

El grado en que un deslizamiento afecta a la población depende de:

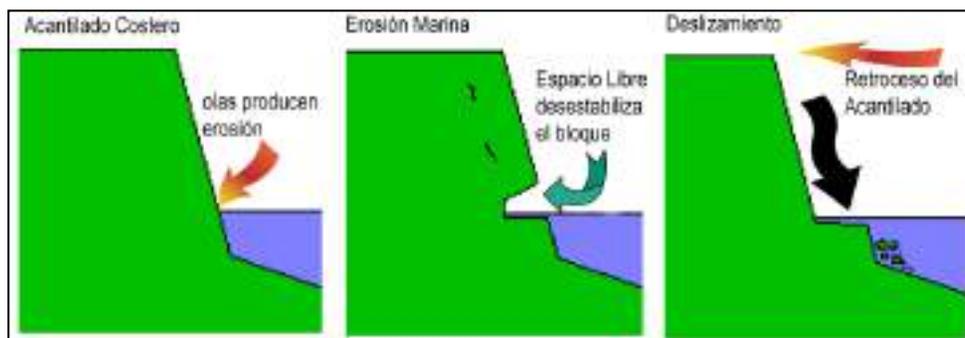
1. Distancia al origen del fenómeno: Por lo general, los deslizamientos son procesos que afectan un área limitada (radios menores a 1 km., incluso menores a 500 m). Hay que considerar que este punto depende directamente del tamaño de volumen desplazado.
2. La intensidad y velocidad con que ocurre el 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.

FIGURA B-15 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 B-16 Ejemplo de erosión por retroceso de terrazas, aplicado al desarrollo de planicies de abrasión



Fuente: Elaboración propia.

A.3.2.3 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.

A.4 Referencias

- 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.
- Centeno, J., Fraile, M., Otero, M. & Pividal, A., 1994. Geomorfología Práctica. Ejercicios de fotointerpretación y planificación geoambiental. Madrid: Ed. Rueda.
- 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.
- 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.
- González-Ferrán, O., 1995. Volcanes de Chile. Santiago: Instituto Geográfico Militar, 410 pág.
- 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.
- lida, K., 1963. A relation of earthquake energy to tsunami energy and the estimation of the vertical displacement in a tsunami source. Journal of Earth Science, 2(1), pp. 49-67.
- Inamura, A., 1942. History of Japanese Tsunamis. Kayo-No-Kagaku, Volumen 2, pp. 74-80.
- Inamura, A., 1949. List of Tsunamis in Japan. Journal of Seismological Society of Japan, Volumen 2, pp. 23-28.
- 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.

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.

Myers, B. & Brantley, S., 1995. Hazardous phenomena at volcanoes, Vancouver, Washington.: USGS Open File Report, pág. 95-231.

Naranjo, J. A., 1987. Interpretación de la actividad cenozoica superior a lo largo de la Zona de Falla de Atacama, norte de Chile. Revista Geológica de Chile, Issue 31, pp. 43-55.

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.

Natural Resources Canada, 2011. Natural Resources Canada. [En línea]

Available at:
<http://atlas.nrcan.gc.ca/auth/english/maps/environment/naturalhazards/tsunami/1>
[Último acceso: 25 11 2011].

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..

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. & Serey, A., 2009. Tsunamigenic, earthquake-triggered rock slope failures during the April 21, 2007 Aisén earthquake, southern Chile (45.5°S). Andean Geology, 26(1), pp. 131-136.

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.

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.

Varnes, D., 1978. Slope movement types and processes, Washington, D.C.: Special report 17VI: Landslides: Analysis and Control, Transportation Research Board.

Watt, S., Pyle, D., Naranjo, J. & Mather, T., 2009. Landslide and tsunami hazard at Yate volcano, Chile as an example of edifice destruction on strike-slip fault zones. Bulletin of Volcanology, 71(5), pp. 559-574.

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].

Wiegel, R., 1970. Tsunamis. En: Wiegel et al., ed. Earthquake Engineering. Engelwood Cliffs: Prentice Hall, pp. 253-306.