Informe Etapa N°4

"ESTUDIO DE RIESGOS SAN ESTEBAN"

ETAPA 4: DIAGNÓSTICO Y ZONIFICACIÓN DE PELIGROS GEOLÓGICOS

REVISIÓN 3
Agosto, 2012

"ESTUDIO DE RIESGOS SAN ESTEBAN"

Este documento corresponde al Estudio de Riesgos ETAPA Nº3 (Revisión 3): Diagnóstico y Zonificación de Peligros Geológicos, de la Actualización del Plan Regulador Comunal de San Esteban encargado por la Secretaría Regional Ministerial de Vivienda y Urbanismo Región de Valparaíso a Habiterra S.A.

EQUIPO CONSULTOR:
Rodrigo Rauld Plott, Geólogo, Doctor en Ciencias
Andrés Fock Kunstmann, Geólogo, MSc en Ciencias, Mención Geología
Constanza Urresty Vargas, Geóloga
Marilina Peñalva, Geóloga, MSc en Riesgo Geológico y Meteorológico
Eduard Salvadó, Ingeniero Geólogo

CONTRAPARTE TÉCNICA:
SEREMI de Vivienda y Urbanismo, Región de Valparaíso

PROFESIONAL QUE SUSCRIBE ESTE INFORME

Rodrigo Rauld Plott
Geólogo, Doctor en Ciencias
Universidad de Chile

RESUMEN

En el marco de la actualización del Plan Regulador Comunal de San Esteban, se ha revisado una serie de antecedentes proporcionados por el mandante y otros estudios científicos.

En este estudio se evaluó la ocurrencia de los procesos geológicos internos de la tierra (endógenos), que incluyen sismicidad y volcanismo, y los procesos geológicos externos (exógenos) que corresponden a inundaciones y remociones en masa. Para esto se realizó una línea base geológica y geomorfológica (a escala 1:5.000) y un inventario de peligros geológicos a partir de publicaciones científicas, antecedentes históricos y análisis de imágenes satelitales. A partir de ello se realizó un análisis de los factores condicionantes y desencadenantes de los peligros estudiados. Finalmente, a partir de esta información, se generaron mapas de susceptibilidad para cada peligro reconocido a escala 1:5.000.

El área de estudio ha sido afectada por sismos importantes, al igual que casi todo Chile. Dado que estos fenómenos son recurrentes y propios de la dinámica de subducción en que se encuentra Chile, no debe descartarse la ocurrencia de grandes sismos por subducción en la planificación a mediano y largo plazo. 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 no debe descartarse la posibilidad de ocurrencia de este tipo de sismos.

El peligro volcánico no sería una amenaza directa en la zona, dada la ausencia de centros volcánicos al norte de los 33°S y al sur de los 27° S. Por lo anterior, no se considera este peligro para la zonificación, ya que en la cuenca del río Aconcagua no existen volcanes activos y la comuna de San Esteban se encuentra a aprox. 100 km del volcán activo más cercano (volcán Tupungatito). 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.

Los peligros de inundación por desborde de cauce se asocian al rio Aconcagua que pasa al Sur de la comuna, a los esteros San francisco y El Cobre, y a zonas de quebradas.

Se reconocieron además, los peligros de deslizamientos y caída de bloques. Se determinó que la ocurrencia de estos peligros es en zonas de laderas poco estables, las que se desarrollan en las zonas de altas pendientes. Esta situación puede verse intensificada producto de la intervención antrópica.

Las principales recomendaciones de este estudio son: implementar un sistema de alerta temprana y planes de evacuación ante eventos de precipitaciones intensas que puedan generar remociones en masa o inundaciones; controlar el escurrimiento de aguas superficiales, su intercepción, captación, conducción y descarga controlada hacia cauces establecidos.

Se recomienda además, zonificar como no edificables los sectores ubicados sobre zonas de susceptibilidad muy alta y como zonas de riesgo aquellas ubicadas sobre zonas de alta susceptibilidad, además de capacitar a la población con respecto a los peligros geológicos.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN 6
1.1 Ubicación Área de Estudio 6
1.2 Objetivos 6
1.3 Aspectos Metodológicos 8
1.3.1 Elaboración de Línea Base 8
1.3.2 Inventario de Peligros Geológicos 9
1.4 Lista de actividades realizadas a la fecha. 10
2. MARCO CONCEPTUAL 12
3. PELIGROS GEOLÓGICOS A SER ESTUDIADOS 14
3.1 Procesos Internos o Endógenos de la Tierra 14
3.1.1 Sismicidad 14
3.1.2 Volcanismo 20
3.2 Procesos Exógenos o Externos de la Tierra 23
3.2.1 Inundaciones Terrestres y Litorales 23
3.2.2 Procesos de Remoción en Masa 26
3.3 Resumen de Peligros Geológicos 31
4. LÍNEA DE BASE 33
4.1 Marco Hidrológico 33
4.2 Marco Geodinámico 33
4.3 Marco Geológico 37
4.3.1 Unidades de Roca 37
4.3.2 Depósitos No Consolidados 38
4.4 Marco Geomorfológico 41
4.5 Marco Hidrogeológico 41
5. INVENTARIO Y DIAGNÓSTICO PRELIMINAR DE PELIGROS GEOLÓGICOS 45
5.1 Remociones en Masa 45
5.1.1 Flujo de Barro agosto 1987 45
5.1.2 Flujo detrítico, febrero 1980. 46
5.1.3 Flujo de barro y detritos, 3 de Mayo de 1993 47
5.1.4 Flujo de barro y detritos, diciembre 1995. 48
5.1.5 Deslizamientos de bloques rocosos. 48
5.1.6 Avalanchas (Aludes) 49
5.1.7 Derrumbes de Montañas 49

5.2 Inundaciones Terrestres 50
5.3 Sismicidad 54
5.3.1 Antecedentes Históricos 54
5.3.2 Sismos registrados por la red sismológica mundial. 57
5.3.3 Principales fuentes sísmicas reconocidas en el área de estudio. 59
5.4 Volcanismo 61
6. DIAGNÓSTICO Y ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD 62
6.1 Peligros No Zonificables 62
6.1.1 Peligro Sísmico 62
6.1.2 Peligro Volcánico 62
6.2 Peligros Zonificables 63
6.2.1 Peligro de Inundaciones Terrestres y Flujos de Detritos o Barro 63
6.2.2 Peligro de Remociones en Masa 66
7. SÍNTESIS DE LOS PELIGROS GEOLÓGICOS ANALIZADOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO . 69
8. RECOMENDACIONES 74
9. REFERENCIAS CITADAS EN EL TEXTO 76

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA Nº 1-1 Ubicación del área de estudio 7
FIGURA Nº 2-1 Etapas de la evaluación de un evento geológico peligroso 13
FIGURA Nº 3-1 Sismicidad mundial entre los años 1980 y 1990, se representan en puntos rojos los epicentros con magnitud >5. Nótese como la sismicidad "ilumina" los límites de las placas tectónicas, dibujados en amarillo 14
FIGURA Nº 3-2 Contexto geodinámico y margen de subducción de Chile 15
FIGURA Nº 3-3 Tipos de sismos que ocurren en un margen de subducción (explicación en el texto) 16
FIGURA Nº 3-4 Tipos de Falla y esfuerzos asociados 17
FIGURA Nº 3-5 Tipos de ondas sísmicas 18
FIGURA Nº 3-6 Amplificación de la vibración generada por un terremoto 19
FIGURA Nº 3-7 Peligros volcánicos asociados a la erupción de un volcán 21
FIGURA Nº 3-8 Clasificación de los tipos de inundaciones 24
FIGURA Nº 3-9 Clasificación de tipos de remoción en masa en relación al movimiento que lo origina y el material constituyente de la ladera 27
FIGURA Nº 3-10 Ejemplos de deslizamientos. A. Deslizamiento Rotacional, B. Deslizamiento traslacional 29
FIGURA Nº 3-11 Ejemplo de erosión por retroceso de terrazas, aplicado al desarrollo de planicies de abrasión 29
FIGURA Nº 4-1 Principales cuencas del área de estudio 34
FIGURA Nº 4-2 Vista en 3D donde se representa el marco geodinámico, se aprecia la Dorsal de Juan Fernández y el lugar donde es subductada frente a los 33º S. La línea verde señala la fosa,

lugar donde subducta la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, las flechas muestran las direcciones y velocidades de convergencia entre ambas placas 35
FIGURA Nº 4-3 Segmentación Andina. Zona marcada en rosado corresponde a la zona de subducción plana 36
FIGURA Nº 4-4 Mapa Geológico del área de estudio 40
FIGURA Nº 4-5 Carta de elevaciones de la comuna de San Esteban 42
FIGURA Nº 4-6 Carta de pendientes de la comuna de San Esteban 43
FIGURA Nº 4-7 Carta de exposiciones de la comuna de San Esteban 44
FIGURA Nº 5-1 Flujo de barro ocurrido en el sector de Guardia Vieja, flanco sur río Aconcagua el 18 de Agosto de 1987) 46
FIGURA Nº 5-2 Flujo detrítico ocurrido en el sector de la Puntilla del Viento el 21 de febrero de 1980) 47
FIGURA Nº 5-3 Canalón excavado por flujo detrítico. Valle del río Blanco. El flujo detrítico sucedió el 27 de diciembre de 1995. 49
FIGURA Nº 5-4 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. 56
FIGURA Nº 5-5 Mapa regional con la sismicidad registrada entre 1973 y 2010 del Catálogo NEIC, junto a perfiles de la sismicidad. El área de estudio se ubica aproximadamente al centro de la figura. 58
FIGURA Nº 5-6 Fallas activas cercanas al área de este estudio. 60
FIGURA Nº 5-7 Ubicación centros volcánicos próximos al área de estudio. Triángulos rojos indican la ubicación de volcanes y rectángulo rojo la ubicación del área de estudio. 61
FIGURA Nº 6-1 Frecuencia de deslizamientos en función de la pendiente del terreno 66
FIGURA Nº 6-2 Mapa síntesis de peligros geológicos del área urbana de San Esteban. 68

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO Nº 3-1 Peligros asociados al volcanismo 22
CUADRO Nº 3-2 Resumen Peligros Geológicos a ser estudiados y su escala de trabajo 32
CUADRO Nº 5-1 Principales crecidas en los períodos 1973-1993 en las áreas aledañas a la zona de estudio 51
CUADRO Nº 5-2 Inventario de inundaciones y temporales históricos del valle del Alto Aconcagua . 51
CUADRO Nº 5-3 Sectores críticos y problemas de inundaciones en el sector alto del río Aconcagua 53
CUADRO Nº 5-4 Datos de terremotos históricos de magnitud superior a 7.5 ocurridos en la zona. . 56
CUADRO Nº 7-1 Síntesis de peligro sísmico para el área de estudio, descripción, inventario, metodología y zonificación 70
CUADRO Nº 7-2 Síntesis de peligro volcánico para el área de estudio, descripción, inventario, metodología y zonificación 71
CUADRO Nº 7-3 Síntesis de peligro de inundaciones para el área de estudio, descripción, inventario, metodología y zonificación 72
CUADRO Nº 7-4 Síntesis de peligro de remociones en masa para el área de estudio, descripción, inventario, metodología y zonificación 73
CUADRO Nº 8-1 Criterios utilizados para definir la zonificación de susceptibilidad y la zonificación urbana recomendada para cada caso 75

ÍNDICE DE PLANOS FUERA DE TEXTO

PLANO Nº1 Mapa Geológico del Área Urbana de San Esteban, Escala 1:10.000.
PLANO N°2 Mapa Síntesis de Peligros Geológicos del Área Urbana de San Esteban, escala 1:40.000.

1. INTRODUCCIÓN

La Secretaría Regional Ministerial de Vivienda y Urbanismo Región de Valparaíso ha adjudicado a Habiterra S.A. la actualización del Plan Regulador Comunal de San Esteban. Como parte de este proceso se elabora un estudio de riesgo de sismos, volcanismo, remoción en masa, inundación por desborde de cauces y canales para el área urbana de la comuna con el objetivo de reunir información, que sirva de base, para definir zonas de riesgo y zonas no edificables para la formulación de los respectivos instrumentos de planificación territorial (IPT).

1.1 *Ubicación Área de Estudio*

El área de estudio está ubicada en el extremo norte de la Provincia de los Andes, entre los 32º25'S y los 32º54' Latitud Sur y los 70º13' y los 70º21' de Longitud Oeste, en la V Región de Valparaíso. Limita al norte con la comuna de Putaendo, al sur con la comuna de Los Andes, al oeste con la comuna de Santa María y al este con Argentina. (FIGURA Nº 1-1). La comuna tiene definido como área urbana a la localidad de San Esteban, y potenciales localidades a ser consideradas como urbanas a Lo Foncea, el Higueral-Chaparrinas, Llanos Norte, El Higueral, Las Golondrinas, Bandurrias y El Cobre.

Los principales accesos al área de estudio corresponden a la ruta 57 y a la ruta 60. La Carretera General San Martín comunica la ciudad de San Esteban con la ciudad de los Andes y Calle Larga.

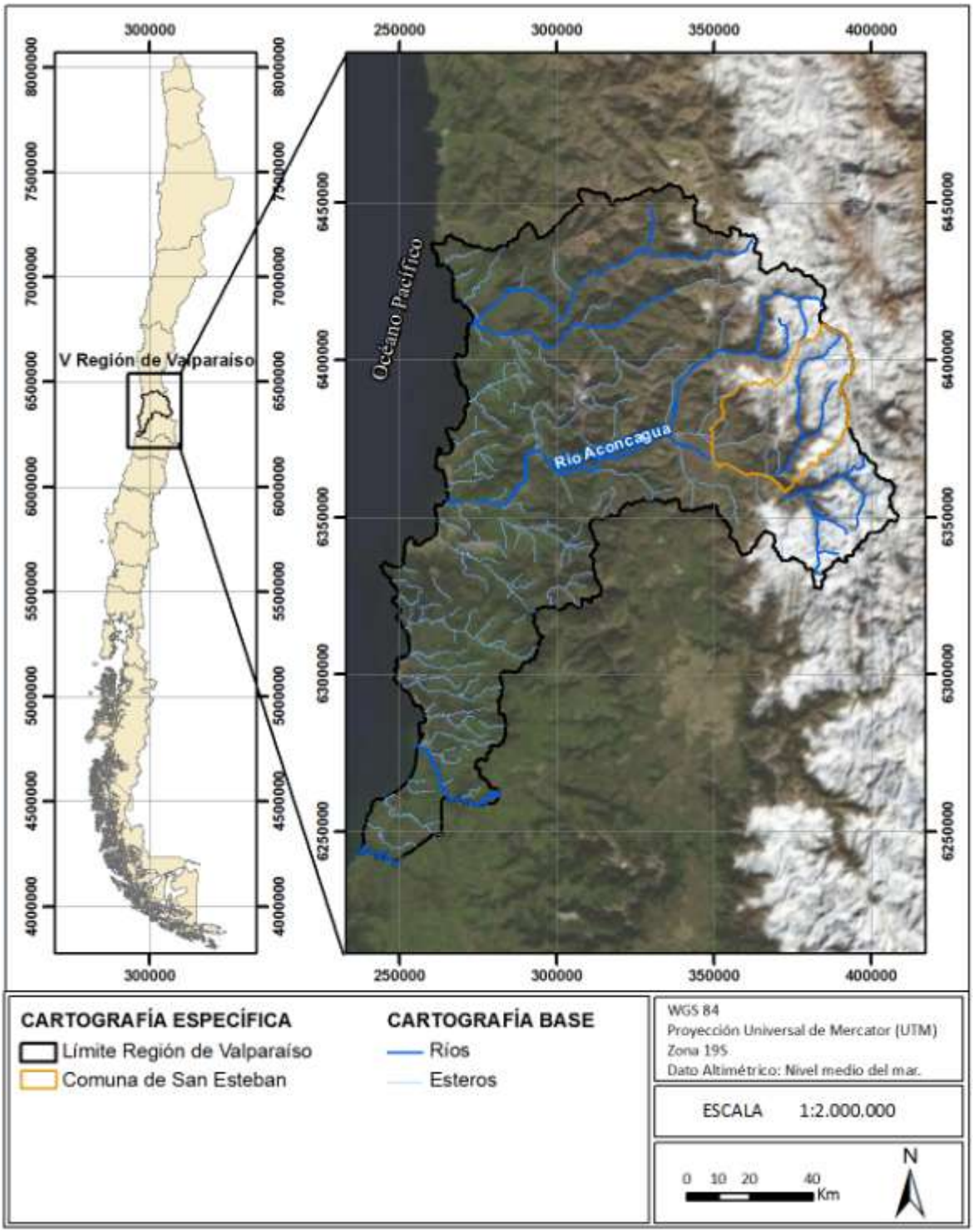
1.2 *Objetivos*

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

Dentro de este estudio, como productos, se han elaborado cartas de susceptibilidad de, inundaciones causadas por desbordes de ríos y activación de líneas de quebradas, remoción en masa -en sus diferentes manifestaciones- (aluviones, derrumbes de rocas, deslizamiento de tierra, licuefacción de suelos u otros relevantes).

El objetivo específico de esta etapa del proyecto consiste en la elaboración de mapas de susceptibilidad, los que se basan en la línea base geológica y geomorfológica del territorio, además de los antecedentes recopilados en el inventario de peligros geológicos acerca de los factores condicionantes y desencadenantes de cada peligro.

FIGURA Nº 1-1 Ubicación del área de estudio



Fuente: Elaboración Propia

1.3 *Aspectos Metodológicos*

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

1. Elaboración de una línea de base geológica y geomorfológica: El objetivo de este punto es identificar los distintos depósitos sedimentarios producto de procesos de remoción en masa e inundaciones, esto es, depósitos aluviales activos e inactivos, depósitos fluviales activos e inactivos, depósitos coluviales y las zonas de generación de coluvios.

2. Catastro de Peligros Geológicos Históricos: En esta tarea se recopilan los distintos peligros geológicos que han afectado los sectores urbanos de la comuna de San Esteban, con la finalidad de identificarlos y ordenarlos cronológicamente.

3. Catastro de Factores Condicionantes: se reúne información acerca de los factores intrínsecos (propios del medio físico) que condicionan la ocurrencia de un peligro geológico.

A partir de todo lo expuesto anteriormente se realizó la zonificación de susceptibilidad de peligros geológicos.

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

1.3.1 Elaboración de Línea Base

1.3.1.1 Caracterización Geológica y Geomorfológica

Las caracterizaciones geológica y geomorfológica se realizaron simultáneamente. Para ello se utilizaron como base los mapas geológicos de (SERNAGEOMIN, 2003) a escala 1:1.000.000 y de (Rivano, et al., 1993) a escala 1:250.000 que abarcan gran parte del área de estudio. También se utilizaron las modificaciones introducidas por (Campbell, 2005).

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

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

Para la generación del DEM y las cartas morfométricas asociadas se utilizaron las curvas de nivel cada 2 m en las áreas urbanas y el Modelo de Elevación ASTER GDEM[1], con un tamaño de celda de 23 metros. Como su nombre lo indica, estos datos topográficos provienen de los datos tomados por el sensor japonés ASTER (Advance Space Borne Thermal Emission and Reflection Radiometer), puesto en órbita por la NASA en el año 1999. Desde el año 2009, está disponible gratuitamente entre los 83º N y 83º S (un 99% de la superficie terrestre). Este modelo genera celdas de 23x23 metros y fue generado a partir de la correlación estereoscópica de imágenes.

1.3.2 Inventario de Peligros Geológicos

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

1.3.2.1 Revisión histórica y bibliográfica

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

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

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

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

Con respecto a los eventos de remoción en masa, se admite que estos ocurren con mayor frecuencia asociados a eventos sísmicos, volcánicos o producidos por altas intensidades de precipitaciones. Considerando lo anterior, se recopilaron datos de los procesos de remoción en masa a partir de la revisión bibliográfica de los eventos generadores.

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

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

La generación del catastro de eventos sísmicos se realizó en base a recopilaciones históricas y de publicaciones científicas Nishenko (1985); Comte, et al. (1986); Comte y Pardo (1991); Comte, et al. (2002); (Lara & Rauld, 2003); (Urrutia & Lanza, 1993). 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)[2]. Esta base de datos corresponde a los sismos registrados en todo el mundo con los instrumentos de dicha institución, e instituciones asociadas, a partir del año 1973. El error asociado a dichos datos es del orden de 50 km, pero dada la cantidad de datos y la extensión temporal de su registro resulta útil para representar la sismicidad a escala regional.

1.3.2.2 Análisis e interpretación de fotografías aéreas e imágenes satelitales

Con el fin de identificar evidencias de peligros geológicos declarados, es decir peligros geológicos que en el pasado ya se han manifestado en el área de estudio, se recopilaron fotografías aéreas e imágenes satelitales.

Además, a partir de las imágenes recopiladas, se realizó el mapeo geológico y geomorfológico, donde se han identificado a una escala adecuada una serie de rasgos, tales como depósitos y cicatrices de deslizamientos. Estos elementos evidencian que el área de estudio ha sido afectada por procesos de remoción en masa en el pasado, y además, permiten deducir algunas características y factores desencadenantes de estos fenómenos, información que será utilizada para la estimación y modelado del alcance de estos procesos.

1.3.2.3 Catastro de Factores Condicionantes y Desencadenantes

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

1. Elevación, pendiente, dirección de drenaje de la ladera (exposición): Fueron elaborados a partir de las curvas de nivel cada 2 m disponibles para las áreas urbanas y del modelo de elevación ASTERGDEM de celdas de 23 metros.
2. Litología: Corresponden a los mapas geológicos elaborados, los que fueron aumentados a una escala mayor en este trabajo.

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

1.4 *Lista de actividades realizadas a la fecha.*

A la fecha se ha llevado a cabo las siguientes actividades:

[2] Disponible en línea en: http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/

1. Recopilación de antecedentes sobre la geología, geomorfología y línea de base de la zona de estudio. Estos antecedentes han permitido delimitar las unidades geológicas reconocibles en el área.
2. Recopilación y análisis de antecedentes topográficos e hidrográficos del área, que permitieron obtener el DEM de la zona y los parámetros geomorfológicos (elevaciones, pendiente y exposición) y determinar las direcciones preferenciales de flujo de material.
3. Catastro de antecedentes y de información bibliográfica sobre el área, que incluyó la biblioteca de SERNAGEOMIN, la base de datos de SEIA y publicaciones varias. Esto ha permitido determinar que la información sobre la zona es escasa, y que la gran mayoría de las crónicas están referidas a localidades vecinas mayores en número de habitantes.
4. Análisis e interpretación de imágenes satelitales
5. Elaboración de Mapas de Susceptibilidad para cada peligro geológico analizado

2. MARCO CONCEPTUAL

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

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

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

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

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

$$R = A \times C$$

Donde A corresponde a la amenaza o peligrosidad (probabilidad de que ocurra un evento dado en un período de tiempo) y C corresponde al costo (ya sea en vidas, valoración económica, metros de

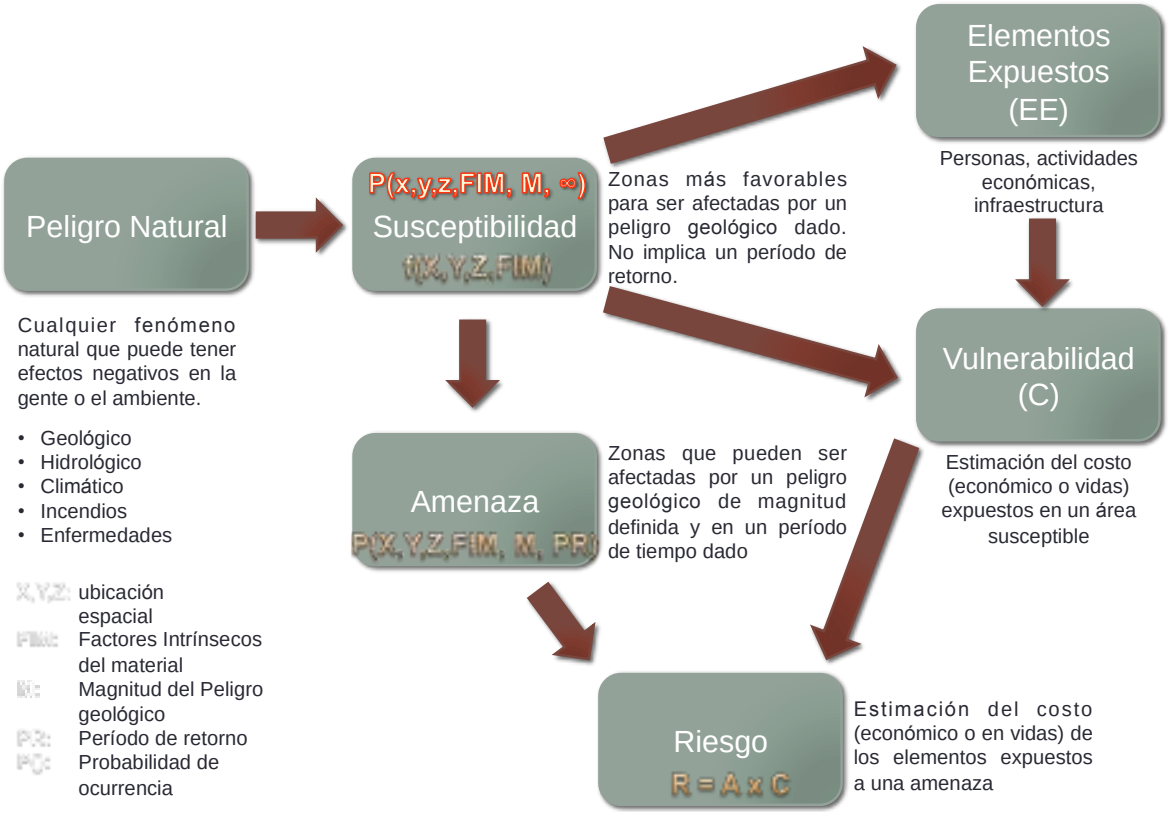
* La traducción literal corresponde a peligro, pero de acuerdo a la ONEMI y al proyecto Multinacional de Geociencias Andino (MAP-GAC) para evitar confusiones se utiliza Amenaza o Peligrosidad

caminos, etc.). La FIGURA Nº 2-1 muestra la relación entre el conocimiento y la estimación de la susceptibilidad, amenaza y riesgo.

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

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

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



Fuente: Elaboración propia basado en Varnes (1984).

3. PELIGROS GEOLÓGICOS A SER ESTUDIADOS

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

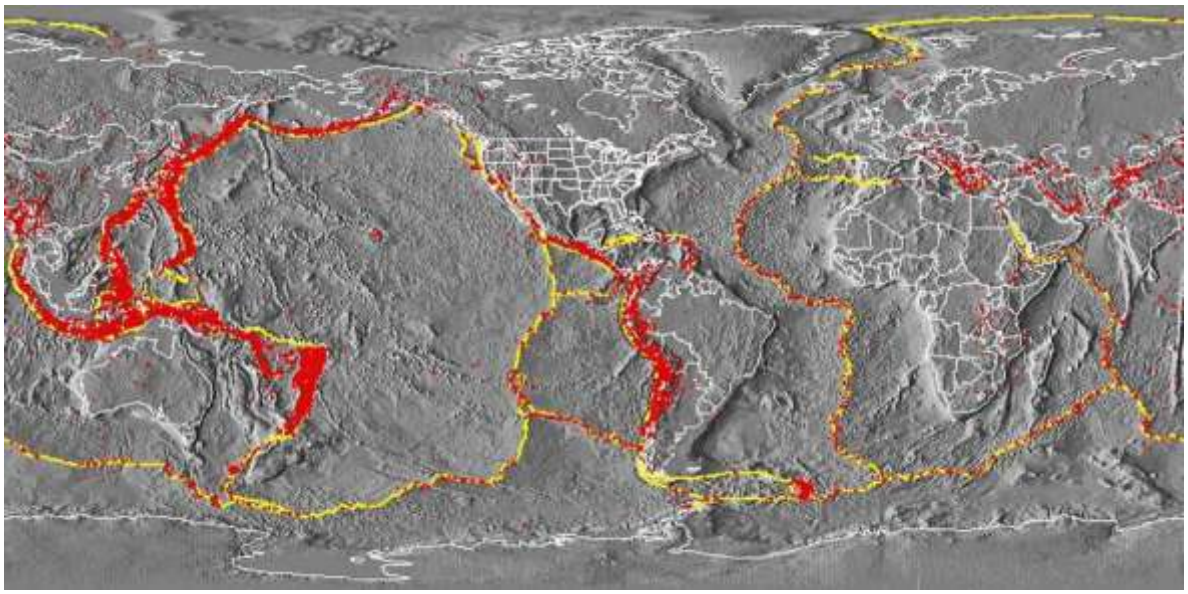
Para cada peligro, se describe en qué consiste, cuáles son sus factores condicionantes, y los principales efectos para la población y sus actividades. El análisis se realiza dividiendo los peligros geológicos en dos grupos, procesos internos o endógenos de la tierra (peligro sísmico y volcánico), y los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

3.1 *Procesos Internos o Endógenos de la Tierra*

3.1.1 Sismicidad

La costa Oeste de Sudamérica está delineada por el borde occidental de la placa Sudamericana y se caracteriza por una intensa sismicidad debido a su convergencia con la placa de Nazca. En planta se aprecia una banda sísmica activa muy angosta (100-150 km) y de profundidad variable (~5-200 km) entre el cordón montañoso de los Andes y la fosa Perú-Chile. La FIGURA Nº 3-1 ilustra la sismicidad mundial que resalta los márgenes de las placas tectónicas y muestra además, cómo Chile se encuentra en un ambiente de gran producción sísmica.

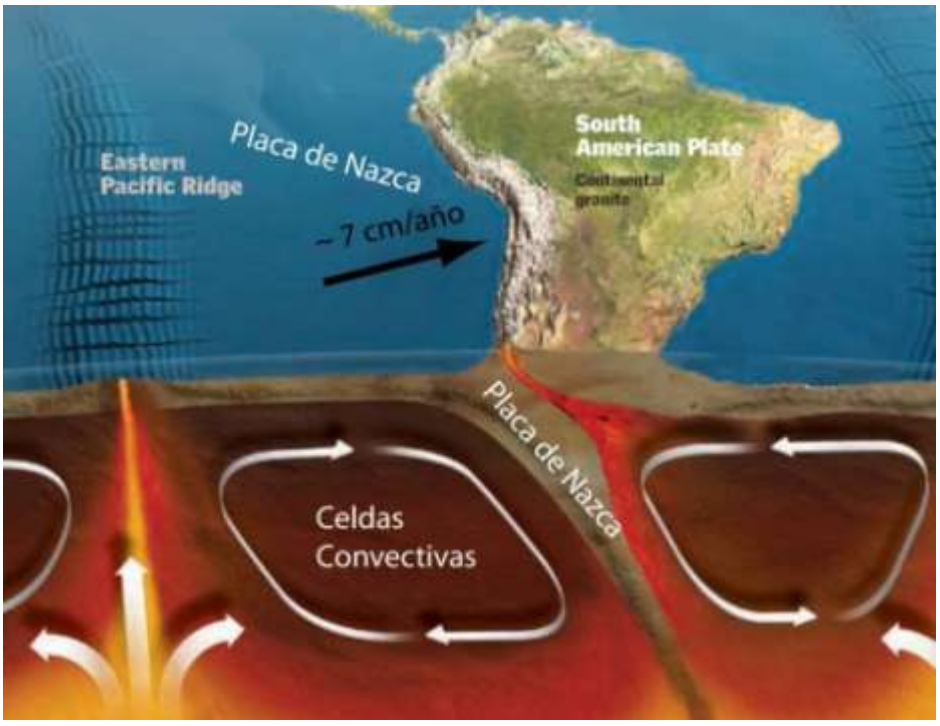
FIGURA Nº 3-1 Sismicidad mundial entre los años 1980 y 1990, se representan en puntos rojos los epicentros con magnitud >5. Nótese como la sismicidad "ilumina" los límites de las placas tectónicas, dibujados en amarillo



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 Nº 3-2). Debido a sus distintas composiciones, la placa oceánica que es comparativamente más densa (de composición basáltica) tiende a introducirse bajo la corteza continental menos densa (de composición granítica). Las fuerzas que actúan sobre la interface entre ambas placas así como las de interacción entre las placas y el manto generan el llamado acoplamiento sísmico interplaca, el que puede entenderse como la resistencia al deslizamiento en la zona de contacto entre ambas. A mayor acoplamiento interplaca la capacidad de generar terremotos de gran magnitud aumenta (Scholz, 1990).

FIGURA Nº 3-2 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, ejemplificados en la FIGURA Nº 3-3, que corresponde a:

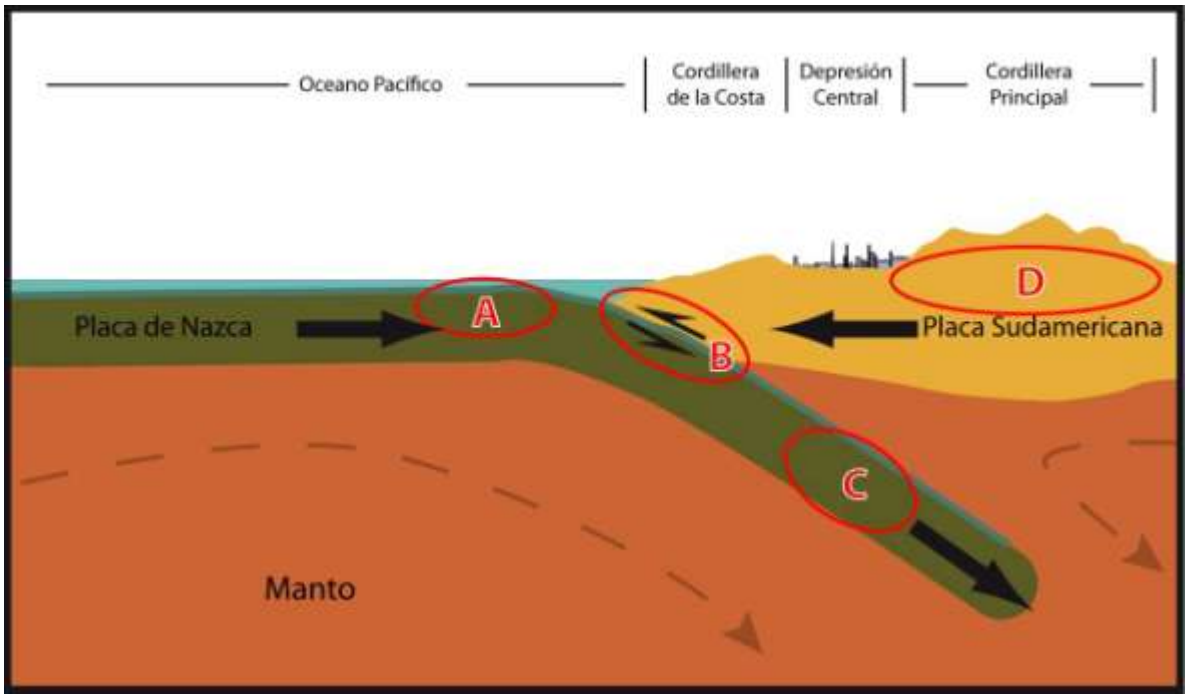
1. Zona A: Sismos "Costa afuera", que se producen por los esfuerzos extensivos por abombamiento en la placa subductante antes de la zona de contacto. A pesar de llegar a tener magnitudes cercanas a M_W = 6, prácticamente no causan efectos significativos en áreas pobladas debido a su ocurrencia en zonas mar adentro.

2. Zona B: Sismos asociados al contacto interplaca, como los ocurridos en Antofagasta 1995, Chile Central 1985, Mejillones 2005 y Constitución-Concepción en el 2010. Estos son producto de la liberación de energía acumulada por la convergencia de placas.

3. Zona C: Sismos intraplaca de profundidad intermedia, como los sismos de Punitaqui 1997, Copiapó 2002, Calama 1950, Tarapacá 2005 y Chillán 1939. Se producen por el fracturamiento tensional de la placa de Nazca (la placa se quiebra por su propio peso).

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

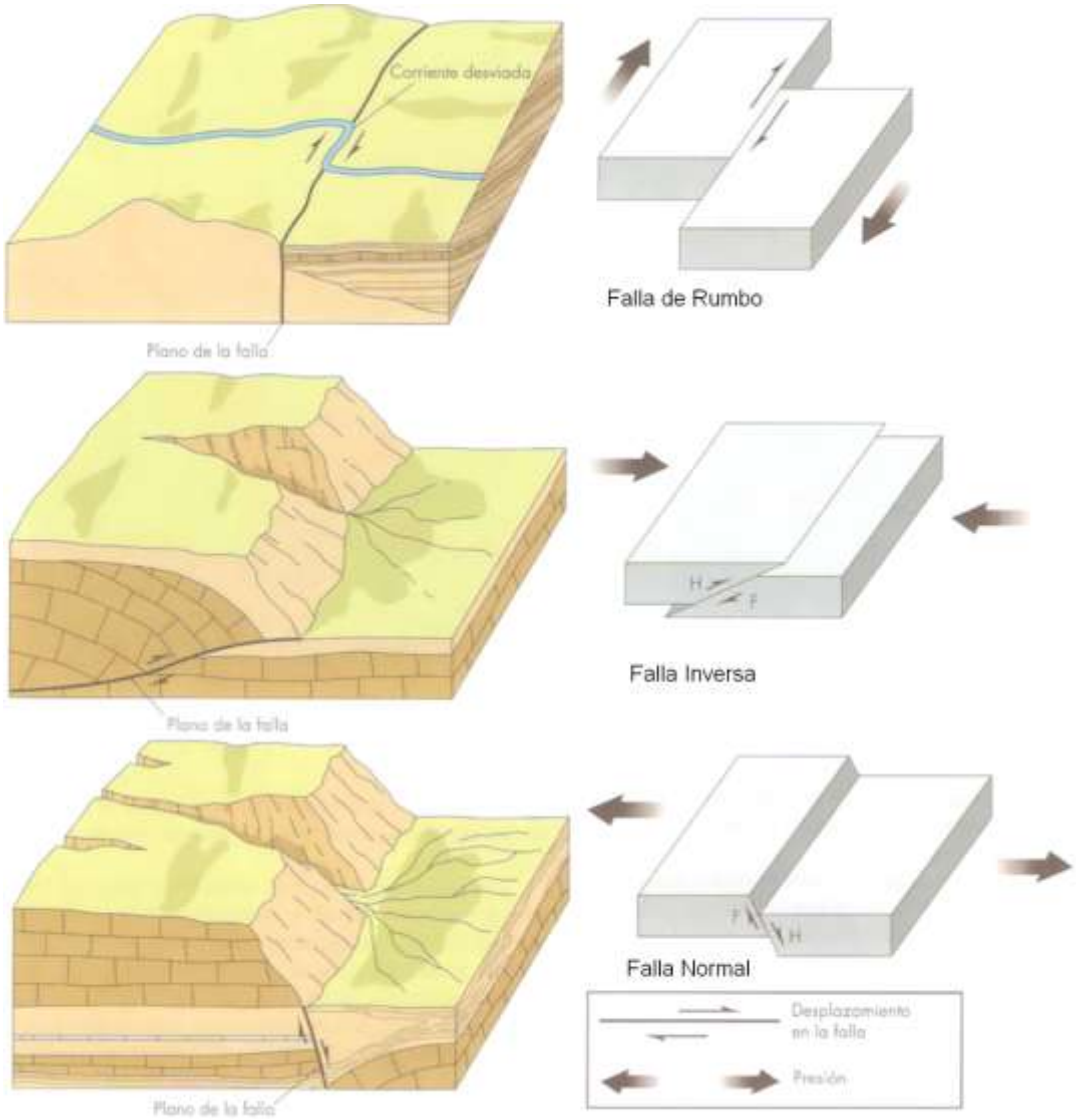
FIGURA Nº 3-3 Tipos de sismos que ocurren en un margen de subducción (explicación en el texto)



FUENTE: Elaboración propia

Independientemente de la ubicación particular de uno u otro sismo, todos ellos corresponden a un desplazamiento violento paralelo al plano de falla que libera la energía acumulada en la interfaz. La energía que se acumula producto de la convergencia de placas, tanto en el contacto interplaca como en la corteza, en algún momento supera la resistencia de las rocas. En dicho instante se produce una ruptura que se propaga a través de un plano de falla, el que, de acuerdo a su geometría, generará diferentes tipos de movimientos (FIGURA Nº 3-4). A su vez, esta ruptura conlleva una liberación de energía que se propaga por medio de ondas sísmicas.

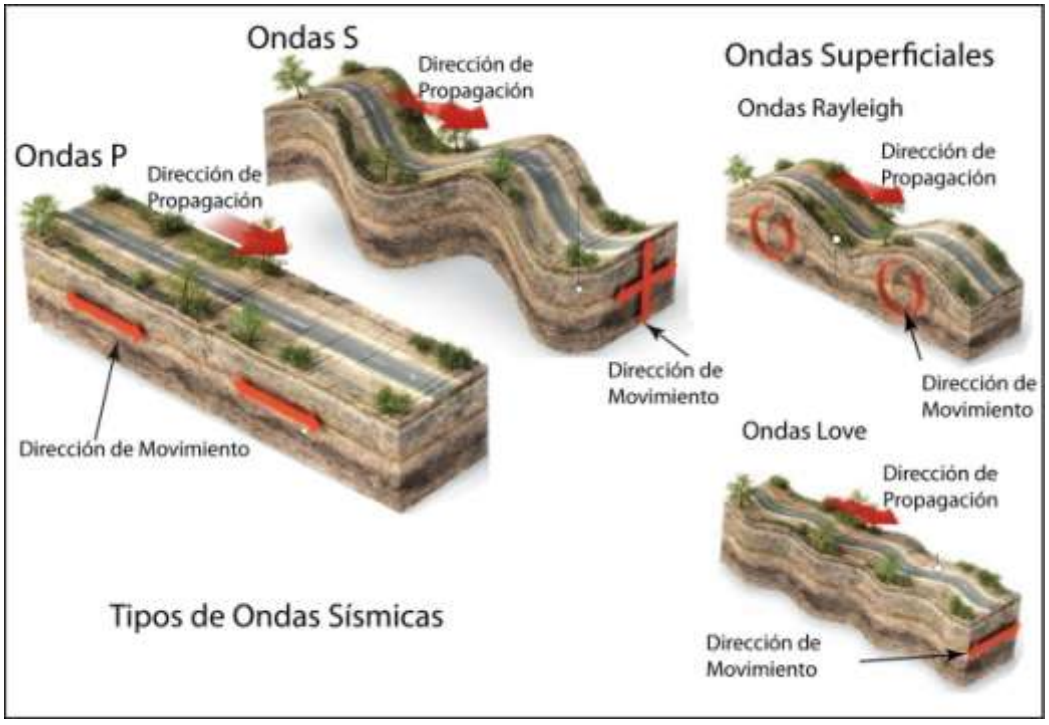
FIGURA Nº 3-4 Tipos de Falla y esfuerzos asociados



Fuente: Keller y Blodgett (2004)

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 Nº 3-5). En las ondas P el movimiento de partículas se produce en forma paralela al de la propagación de la onda y en las ondas S es en dirección perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Las ondas Rayleigh tienen un movimiento oscilatorio elíptico y las ondas Love tienen un movimiento oscilatorio horizontal. Con respecto a su impacto en superficie, debido a que las ondas S transportan la mayor cantidad de energía y a que las ondas superficiales tienden a tener movimientos de mayor frecuencia, ambos tipos corresponden a los de carácter más destructivo del movimiento sísmico. Aun así, a medida que las ondas se alejan de la fuente van perdiendo o disipando energía, siendo cada vez menos destructivas, fenómeno que se conoce como atenuación.

FIGURA Nº 3-5 Tipos de ondas sísmicas



Fuente: Modificado de Enciclopedia Britannica (2008)

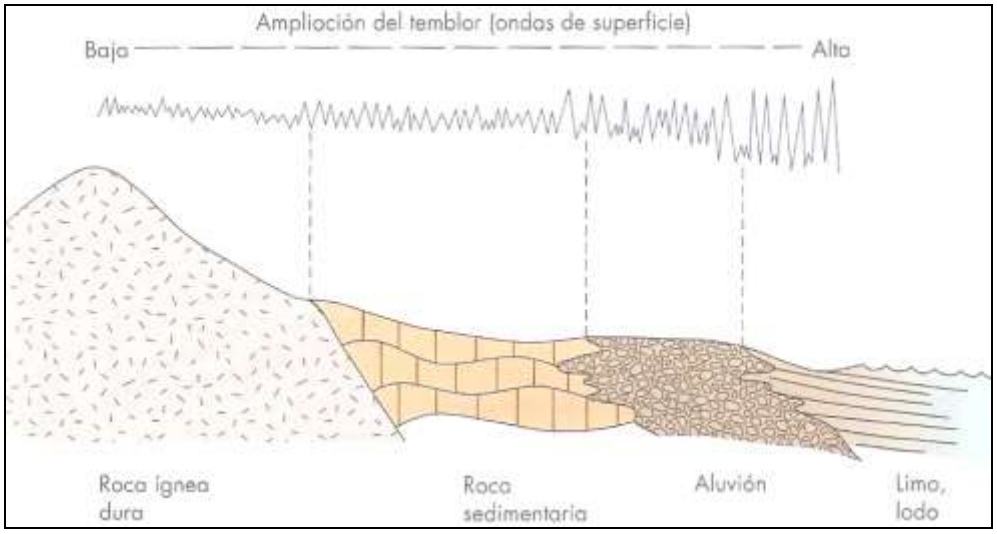
Para medir los sismos se utilizan, principalmente, dos escalas: *magnitud* e *intensidad*. La *magnitud* es una medida única y objetiva, que normalmente se relaciona con la escala de RICHTER (M_S). Actualmente para grandes sismos se utiliza la escala de magnitud de momento (M_W) que se calcula a partir 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 Nº 3-6).

El principal efecto asociado a la ocurrencia de sismos son fuertes movimientos del terreno, que originan un peligro directo sobre las estructuras y sobre las personas, debido a las fuertes aceleraciones generadas por las ondas sísmicas. Sumado a lo anterior, la ocurrencia de estos fenómenos es generalmente sin previo aviso, por lo que la única manera de mitigar el riesgo es con campañas de educación y estrictas normas de construcción. Muchos de estos fenómenos son acompañados por asentamientos en las superficies, normalmente irregulares, dañando construcciones, infraestructura y cañerías. Esto implica en una alta vulnerabilidad estructural, económica y social. Particularmente con respecto a esta última se deben mencionar las potenciales pérdidas de vidas humanas y heridos por el derrumbe de estructuras, además de la vulnerabilidad a enfermedades gastrointestinales y epidemias por el colapso de los sistemas sanitarios y de

conectividad, entre los innumerable efectos adversos para la sociedad que provocan este tipo de fenómenos.

FIGURA Nº 3-6 Amplificación de la vibración generada por un terremoto



Fuente: Keller y Blodgett (2004)

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

Los deslizamientos y derrumbes se dan en diversos tipos de suelos y bajo variadas condiciones sismotectónicas, incluso se han detectado en sismos de grado Mw = 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)). Para más detalle acerca de estos procesos ver el capítulo 3.2.2 “Procesos de Remoción en Masa”.

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

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

acompañados por asentamientos en las superficies, normalmente irregulares, dañando construcciones, infraestructura y cañerías.

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

1. Depósitos o suelos, granulares poco consolidados (sueltos y no cementados) de tamaño fino a medio (limo a arena, aunque en algunos casos se ha presentado en arcillas y en gravas). Típicamente pueden ser rellenos artificiales, especialmente aquellos creados por relleno hidráulico (ej. puertos y tranques de relaves), depósitos eólicos (dunas), depósitos de playas o de cursos de agua lo suficientemente jóvenes para estar sueltos. Los suelos con partículas de diferentes tamaños son menos propensos a sufrir licuefacción, debido a que las partículas menores tienden a rellenar los espacios entre las mayores, reduciendo así la tendencia a densificación del suelo y evitando los efectos del aumento de presión de agua. También influye la forma de las partículas que conforman el suelo, siendo un depósito de partículas redondeadas más susceptible de sufrir licuefacción.

2. Saturación de los depósitos por aguas subterráneas, el agua debe rellenar los espacios entre los granos de limo o arena. Puede producirse en zonas donde el nivel de agua subterránea es somero como en desembocadura de cursos de agua, humedales, pantanos, vegas y zonas costeras.

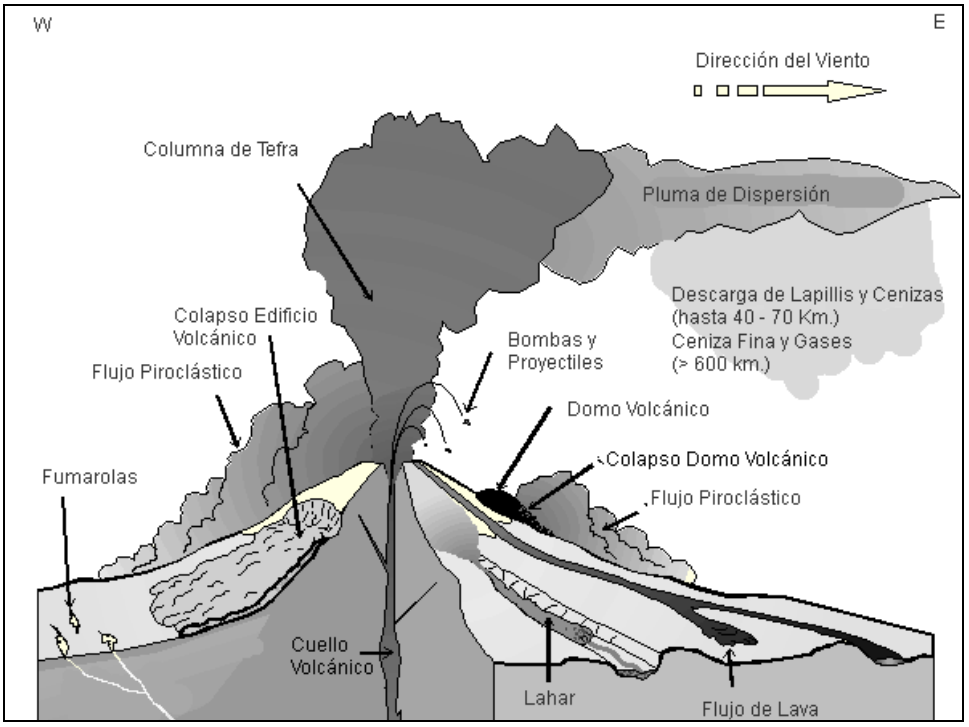
3. Fuertes movimientos sísmicos, durante los cuales las ondas sísmicas aumentan la presión del agua contenida en los depósitos. Cabe destacar, que todo Chile, en especial desde la península de Taitao al norte, tiene el potencial de ser afectado por grandes terremotos.

3.1.2 Volcanismo

El peligro volcánico deriva de los procesos asociados a la erupción de un volcán. En Chile el volcanismo activo se distribuye a los largo de de la Cordillera de los Andes, pero de forma discontinua. En la zona entre los 18º y 27ºS y aquella al sur de los 33ºS se ubica el volcanismo activo, mientras que entre los 27º-33ºS está ausente. Los principales peligros asociados a una erupción volcánica se resumen en la FIGURA Nº 3-7 y en el CUADRO Nº 3-1.

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

FIGURA Nº 3-7 Peligros volcánicos asociados a la erupción de un volcán



Fuente: Myers y Brantley (1995)

Los flujos de lava se producen cuando material magmático se desplaza aguas abajo del centro de emisión. El alcance que tendrán estos flujos está determinado por la tasa de efusión (emisión del centro volcánico), la pendiente del terreno sobre el cual la lava escurre y la viscosidad de la lava. Además, en las cercanías del centro de emisión se producen comúnmente temblores de magnitud inferior a 6 en la escala de Richter (Mw), pero a poca profundidad (entre 1 y 20 km), los que están asociados a intensidades mayores a VI en las cercanías del epicentro. Estos sismos provienen de diversos procesos, tales como ascenso del magma y fracturamiento de la corteza, explosiones volcánicas y esfuerzos tectónicos compresivos y expansivos asociados al ciclo eruptivo (González-Ferrán, 1995).

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

CUADRO Nº 3-1 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	
	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
Remociones en masa	*Lahares*	Daños a estructuras, arrastres de materiales, recubrimiento por barros.	Decenas a centenares de kilómetros	Red de drenaje
	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
Otros	*Ondas de Choque*	Rotura de cristales y paneles.	Decenas de kilómetros	Dirección del viento y geomorfología
	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.

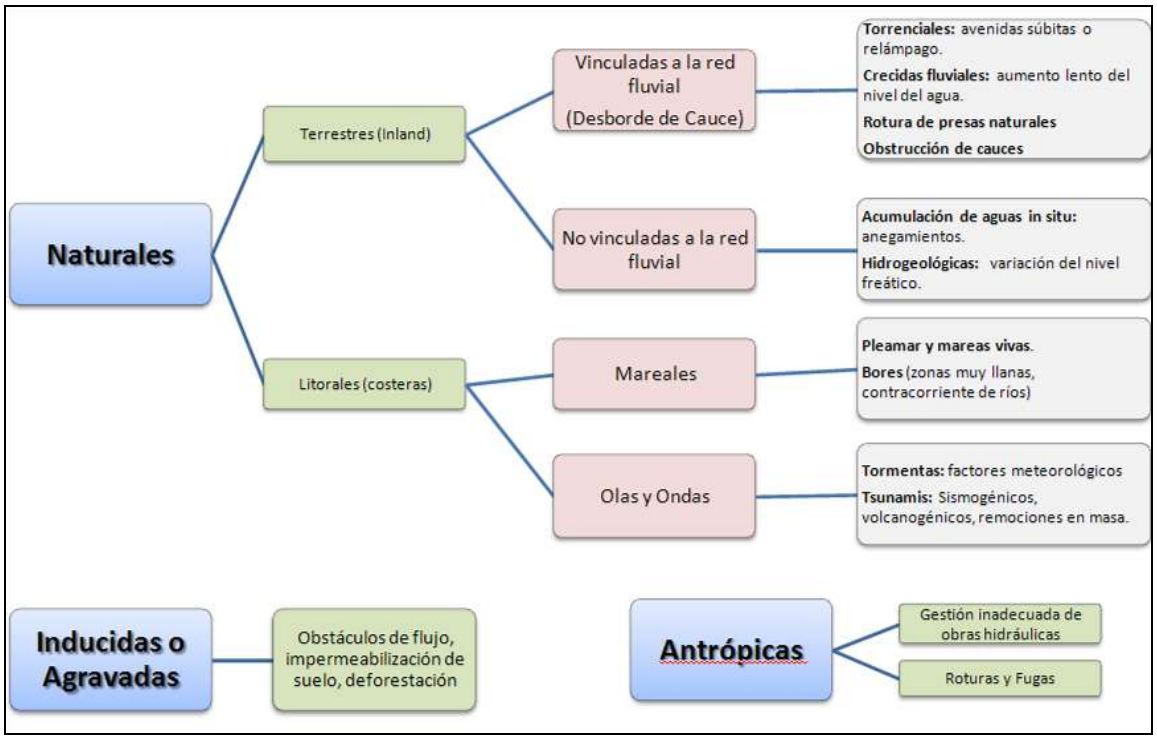
3.2 *Procesos Exógenos o Externos de la Tierra*

3.2.1 Inundaciones Terrestres y Litorales

Las inundaciones, sin considerar aquellas generadas por causas antrópicas, pueden ser de dos tipos (FIGURA Nº 3-8): (1) terrestres, en el sentido de “tierra adentro”, en las que aguas dulces anegan territorios al interior de los continentes, y (2) litorales o costeras, en las que aguas marinas o lacustres-palustres invaden los sectores limítrofes con el dominio terrestre. Los procesos de inundación pueden originarse por varios factores, tales como lluvias intensas durante temporales, pero también pueden originarse por colapso o desbordamiento de represas y canales, marejadas en zonas costeras, o como afloramiento de aguas subterráneas en zonas pantanosas.

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

FIGURA Nº 3-8 Clasificación de los tipos de inundaciones



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

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

3.2.1.1 Inundación por Desborde de Cauces

Como su nombre lo indica, estos tipos de fenómenos ocurren cuando ríos o esteros desbordan su cauce natural anegando las terrazas fluviales laterales o adyacentes, debido a la ocurrencia de caudales extremos. Estos fenómenos se producen generalmente debido a eventos de precipitaciones líquidas intensas y/o prolongadas en el tiempo. Los valores que pueden alcanzar los caudales, así como el tamaño del cauce, dependen también de otros factores como del área de la cuenca correspondiente, su forma, la diferencia de cota, la presencia de rocas o sedimentos permeables, etc.

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

1. Perennes: ríos o esteros con cuencas que abarcan grandes áreas y que tienen sus cabeceras en zonas cordilleranas. Aunque no presenten necesariamente una escorrentía superficial continua, se consideran como perennes dado que la mayoría del flujo escurre en el acuífero ubicado bajo la superficie. Estos presentan cauces de gran extensión, bien definidos, con diferentes niveles de terrazas fluviales, y fácilmente identificables a partir del análisis estereoscópico de fotos aéreas. Las terrazas más altas generalmente están ocupadas por actividades agrícolas o asentamientos humanos.

2. Intermitentes: Esteros y quebradas de escurrimiento temporal como consecuencia directa de precipitaciones intensas. En general, algunas de estas quebradas pueden presentar amenaza por fenómenos de remociones en masa del tipo flujos de detritos, existiendo una estrecha relación entre estos fenómenos e inundaciones por escorrentía torrencial de gran velocidad. Como se explicará posteriormente, los flujos de detritos, al perder su carga sólida, van transformándose paulatinamente en inundaciones torrenciales. Normalmente no existen estaciones fluviométricas en estos cauces, por lo que la estimación de caudales máximos se debe hacer con modelos matemáticos y estadísticas de precipitaciones máximas de gran intensidad.

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

1. Tiempo de aviso: En general, las inundaciones por desborde de cauce tienen un tiempo de aviso suficiente, ya que los procesos de inundación son paulatinos y permiten evacuar a la población.

2. La intensidad y velocidad con que ocurre el fenómeno

3. Densidad de población: En caso de que la población se encuentre directamente en la zona de inundación y no sea evacuada oportunamente, pueden ocurrir muertes, heridos, enfermedades, daños estructurales, etc. Si la inundación no afecta directamente a la población, puede producir cortes de camino, daños a la infraestructura sanitaria (por ejemplo, destruir captaciones de agua para el consumo humano) con un costo económico en reparaciones y medidas de mitigación.

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

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

En las zonas urbanas consolidadas, las acumulaciones de aguas lluvia ocurren especialmente en cruces viales, donde la evacuación de las aguas lluvias es insuficiente, ya sea por el colapso de los sistemas de colección, acumulación de basuras que obstruyen los desagües, la no existencia de redes de evacuación y vialidad pavimentada, por la diferencia de nivel de las carpetas de rodado en las intersecciones de las calles existentes, o por diseñar las obras de mitigación para un período de retorno no adecuado.

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

1. Tiempo de aviso: Los sistemas de emergencia y aviso a la población disminuyen considerablemente la vulnerabilidad social. Por lo demás, en general los procesos de inundación son paulatinos y permiten evacuar a la población.

2. La intensidad y velocidad con que ocurre el fenómeno

3. Densidad de población: En caso de que la población se encuentre directamente en la zona de inundación, pueden ocurrir muertes, heridos, enfermedades, daños estructurales, etc. Si la inundación no afecta directamente a la población, puede producir cortes de camino, daños a la infraestructura sanitaria (por ejemplo, destruir captaciones de agua para el consumo humano) o un costo económico en reparaciones y medidas de mitigación.

3.2.2 Procesos de Remoción en Masa

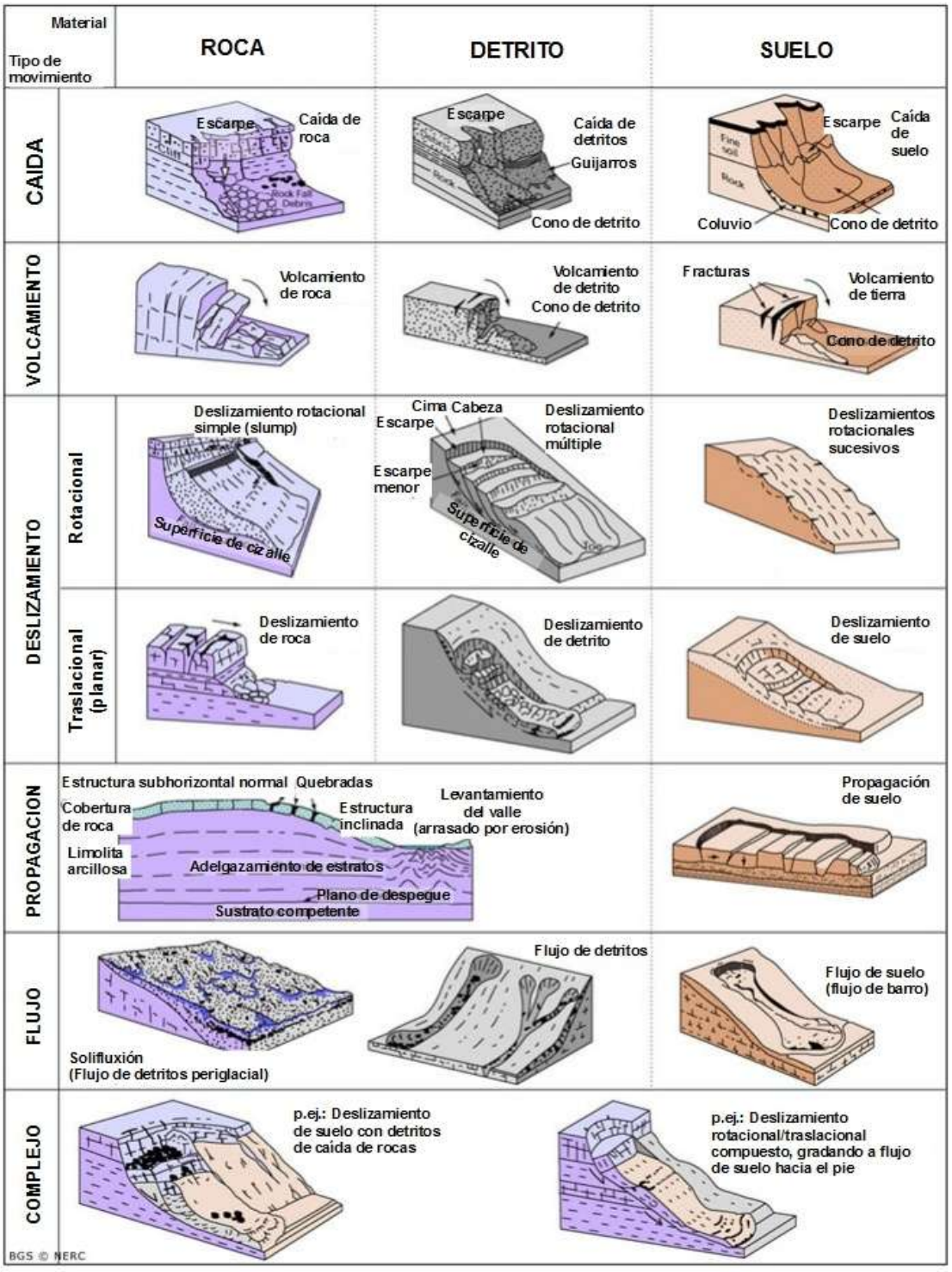
El término “remoción en masa” incluye una amplia variedad de procesos que generan el movimiento aguas abajo de los materiales que constituyen las laderas, incluyendo roca, suelo, relleno artificial o una combinación de las anteriores (FIGURA Nº 3-9). El movimiento de estos materiales puede ser por caída, volcamiento, deslizamiento, propagación lateral o flujo (PMA-GCA, 2007).

3.2.1.3 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.

FIGURA Nº 3-9 Clasificación de tipos de remoción en masa en relación al movimiento que lo origina y el material constituyente de la ladera



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

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.

3.2.1.4 Deslizamientos

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

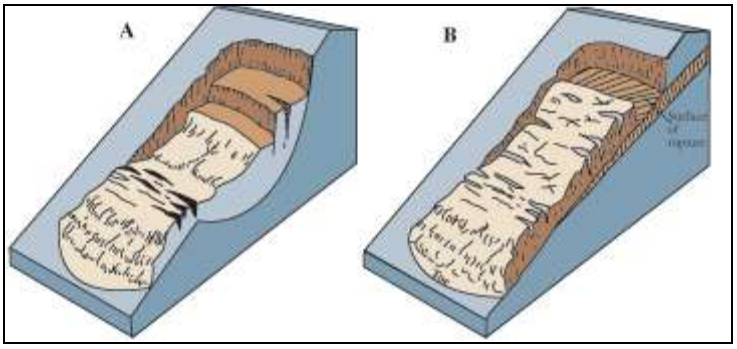
Estos fenómenos pueden ocurrir de varias formas dependiendo de las propiedades del material y las características geológicas y geomorfológicas del entorno, siendo principalmente divididos en rotacionales y traslacionales (FIGURA Nº 3-10). Esto implica que las superficies de ruptura son ya sea curvas y cóncavas o a lo largo de un plano o superficie ondulada, respectivamente.

Estos fenómenos incluyen los deslizamientos que ocurren durante el retroceso de terrazas fluviales producto de la erosión fluvial o el retroceso de acantilados costeros por erosión marina basal, en especial al desarrollo de terrazas de abrasión. Este proceso es causado por la fuerza de las olas, las que cavan cavernas y desestabilizan el bloque superior, provocando que éste caiga por su propio peso (FIGURA Nº 3-11). Ello produce además que el acantilado costero se encuentre en constante retroceso, lo que permite definir como zona de alta susceptibilidad todas las áreas cercanas al acantilado costero. Los mismos procesos de erosión ocurren en valles con erosión fluvial activa.

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

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

FIGURA Nº 3-10 Ejemplos de deslizamientos. A. Deslizamiento Rotacional, B. Deslizamiento traslacional



Fuente: Modificado de Landslide Types and Process, USGS. Fact Sheet 2004-3072. Disponible en: http://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/images/Fig3grouping-2LG.jpg

FIGURA Nº 3-11 Ejemplo de erosión por retroceso de terrazas, aplicado al desarrollo de planicies de abrasión



Fuente: Elaboración propia

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

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

2. La intensidad y velocidad con que ocurre el fenómeno: En general, dado que estos procesos son de alta velocidad los daños potenciales son altos.

3. Densidad de población: A mayor densidad de población y área expuesta susceptible de ser afectada, mayores serán los daños esperados. Si la población se encuentra directamente en el área de alcance de un deslizamiento, la vulnerabilidad, estructural y económica es muy alta ya que la pérdida de vidas, viviendas y productividad son efectos típicos de este peligro geológico. Por otro lado, si un deslizamiento afecta a caminos, acueductos o líneas

eléctricas puede producir aislamiento, enfermedades gastrointestinales y pérdidas económicas en general para la población.

4. Tiempo de aviso: Sin estudios de detalle no hay forma de predecir este tipo de procesos. Si se realizan estudios específicos, es posible conocer el o los factores gatillantes de las remociones en masa en un área determinada. Si estos factores gatillantes pueden ser monitoreados, es posible generar sistemas de alerta. Por ejemplo, si el factor gatillante son las precipitaciones sobre un cierto nivel umbral de intensidad, es posible generar sistemas de alerta que se activen cuando se sobrepasa dicho umbral.

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

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

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

Los flujos o "aluviones" del 18 de Junio de 1991 en Antofagasta y del 3 de Mayo de 1993 en la Quebrada de Macul en Santiago Oriente son ejemplos de eventos que han suscitado el interés nacional tanto por el alto grado de daños materiales como el costo de vidas humanas. Estos eventos

han sido, por otra parte, un aporte para el conocimiento de los umbrales de intensidad de precipitaciones mínimas para la generación de flujos de detritos en Chile. En el caso de Antofagasta, en una de las zonas más secas del país, se estimaron precipitaciones mínimas de 30 mm en 24 horas para la generación de flujos de detritos (Hauser, 1997). En el caso de Santiago Oriente, se contó con datos pluviográficos más precisos, donde se registraron casi 10 mm en una sola hora (Naranjo & Varela, 1996). Anteriormente, para la Región Metropolitana se estimó un mínimo de 60 mm en 24 horas para la generación de flujos de detritos (Hauser, 1985).

Si bien los casos anteriores se encuentran fuera del área de estudio, cabe destacar que corresponden a los pocos eventos donde se ha relacionado cuantitativamente la ocurrencia de estos fenómenos y la intensidad de precipitaciones. Sin embargo, estos constituyen datos valiosos en cuanto a los umbrales de intensidad de precipitaciones en las que se podrían generar flujos de características catastróficas.

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

1. Tiempo de aviso: Los sistemas de emergencia y alerta a la población disminuyen considerablemente la vulnerabilidad social. Si se tienen mediciones continuas de la intensidad de precipitación, será posible alertar a la población de que existe la posibilidad de que se genere un flujo, entregando quizás minutos valiosos que podrían salvar vidas.

2. Distancia al origen del fenómeno: Mientras más alejado sea el origen, y si se cuenta con sistemas de emergencia y alerta a la población, se puede disminuir la vulnerabilidad social.

3. La intensidad y velocidad con que ocurre el fenómeno (tamaño del flujo): Un flujo de mayor tamaño y rápido tiene mayor capacidad de afectar a una población que uno más pequeño y lento.

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

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

3.3 *Resumen de Peligros Geológicos*

En el CUADRO Nº 3-2 se incluyen los principales peligros geológicos y la escala de las distintas fuentes de información asociadas a cada uno.

CUADRO Nº 3-2 Resumen Peligros Geológicos a ser estudiados y su escala de trabajo

PELIGRO	DESCRIPCIÓN	PELIGROS ASOCIADOS	ESCALA	ZONIFICACIÓN A PARTIR DE:
Volcánico	El peligro volcánico, se asocia a los procesos asociados a la erupción de un volcán. Aunque en general, los centros volcánicos se encuentran emplazados donde la densidad demográfica es baja, los productos asociados a una erupción volcánica pueden tener alcances de centenares de kilómetros.	Lluvia de Tefra y Proyectiles Balísticos	>1:100.000	Antecedentes Históricos y Comparación con Otras zonas
		Flujos Piroclásticos	1:50.000	Antecedentes Históricos, Mapas de Acumulación, Mapas Geológicos
		Escurrimiento de Lavas	1:50.000	Antecedentes Históricos, Mapas de Acumulación, Mapas Geológicos
		Remociones en masa y lahares	1:50.000	Antecedentes Históricos, Mapas de Acumulación, Mapas Geológicos
		Sismicidad	>1:100.000	Antecedentes históricos
Remociones en Masa	Procesos en las que un volumen de roca o suelo es transportado por procesos gravitacionales. Se reconocen 2 tipos principales, los deslizamientos y las Caídas de Rocas. Su alcance es en general limitado, y debe ser tratado como un peligro geológico local (escala <1:10.000). El estudio a detalle se realizará dentro de las zonas urbanas.	Deslizamientos	1:20.000	Interpretación de Fotografías aéreas, Mapa Geológico, Mapa Geomorfológico, Métodos Bayesianos.
		Desprendimiento o Caída de Rocas	1:20.000	Interpretación de Fotografías aéreas, Mapa Geológico, Mapa Geomorfológico, Métodos Bayesianos.
Flujos e Inundaciones	Análisis de los principales peligros asociados a eventos pluviométricos extremos, los flujos de detritos, referidos comúnmente como 'aluviones', e inundaciones. Aguas arriba se tratarán a una escala 1:50.000 o 1:25.000, dependiendo de los datos disponibles y en las zonas urbanas a una escala 1:5.000	Flujos de Detritos	1:20.000	Interpretación de Fotografías aéreas, Mapa Geomorfológico y Mapa Geológico.
		Inundaciones por desborde	1:20.000	Antecedentes Históricos, Interpretación de Fotografías aéreas, Mapa Geomorfológico y Mapa Geológico.
		Inundaciones por anegamiento	1:20.000	Antecedentes Históricos, Interpretación de Fotografías aéreas, Mapa Geomorfológico y Mapa Geológico.
Sismicidad	Se analizarán los principales eventos sísmicos y los peligros asociados a ellos.	Movimientos de Terreno	>1:100.000	Antecedentes Históricos y Comparación con Otras zonas

Fuente: Elaboración Propia.

4. LÍNEA DE BASE

4.1 *Marco Hidrológico*

La comuna de San Esteban se ubica dentro de la cuenca hidrográfica del Rio Colorado, el estero San Francisco y el estero del Cobre (FIGURA Nº 4-1), estas cuencas tienen un área de 830 km^2 y 389 km^2 respectivamente y forman parte de la cuenca del río Aconcagua. Se extienden al norte de la Provincia de Los Andes y tienen un régimen mixto, pluvio-nival con variación estacional de su caudal. El río Colorado debe su nombre al limo y otros sedimentos rojizos que enturbian sus aguas en las crecidas. Se origina al pie del paso del Rubio, de los esteros del Portillo Hondo y de los Azules.

4.2 *Marco Geodinámico*

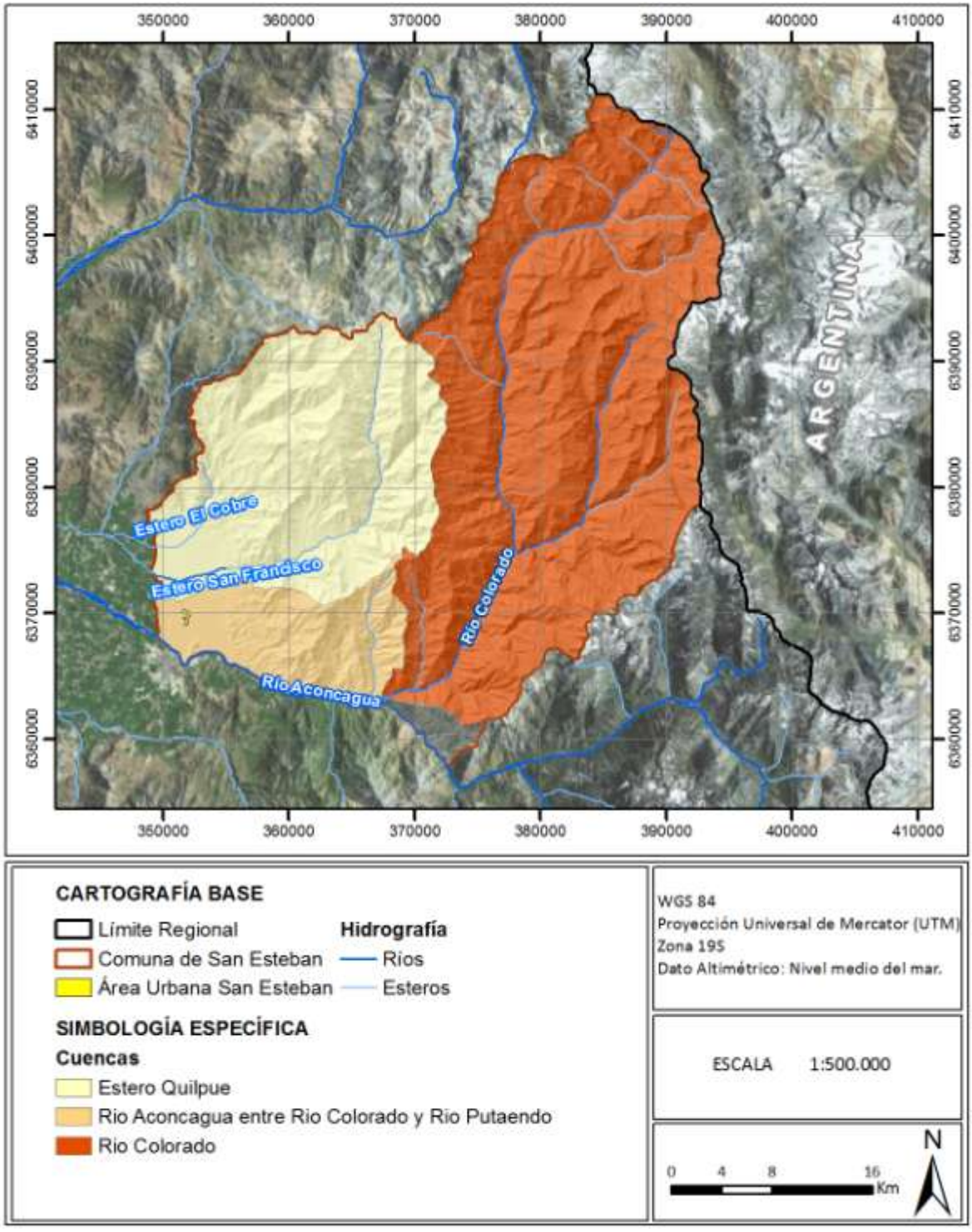
Chile se ubica en un margen convergente de placas tipo océano-continente (FIGURA Nº 4-2), donde la Placa Oceánica de Nazca subducta a la Placa Continental Sudamericana bajo su margen occidental, con una tasa actual de convergencia se estima en 8 cm/año (DeMets, et al., 1994), activa al menos desde, el Jurásico (Ramos, et al., 1986), (Mpodozis & Ramos, 1989)) y ha tenido variaciones en la tasa de convergencia durante el Eoceno – Mioceno que van desde 5 a 15 cm/año (Somoza, 1998).

El área de estudio se encuentra alrededor de los 32°S, lo cual enmarcado dentro del esquema de segmentación andina corresponde al límite entre una zona de subducción plana, al norte de los 32ºS, y una zona de subducción normal, al sur de los 32ºS (FIGURA Nº 4-3). ((Mpodozis & Ramos, 1989), (Charrier, et al., 2007)). La zona de subducción plana se caracteriza por un ángulo de subducción bajo (~10º) ((Isaacks, 1988), (Mpodozis & Ramos, 1989), (Ramos, et al., 2002) y en ella destacan las siguientes características:

a) La costa Oeste de la placa Sudamericana tiene, al norte de los 33ºS, un rumbo aproximado NS, mientras que al sur de los 33º la costa posee un rumbo aproximado N20ºE
b) No se aprecia el desarrollo de una depresión central al norte de los 32ºS, en cambio se presentan valles transversales en el antearco.
c) No hay registro de volcanismo cuaternario en la Cordillera Principal entre los 27ºS y los 32ºS.
d) En Argentina al norte de los 32ºS se desarrollan las Sierras Pampeanas, que están asociadas a una intensa sismicidad cortical superficial en Argentina y al ensanchamiento del orógeno.

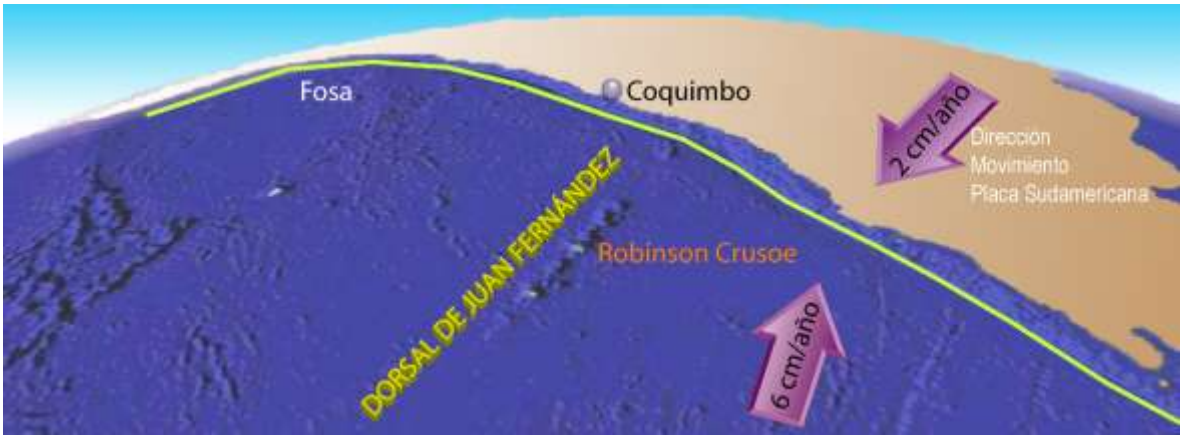
La subducción a lo largo de Chile se caracteriza por presentar terremotos de gran magnitud, estructuras tectónicas de gran escala, fenómenos directamente relacionados con la dinámica que genera la placa subductada, ubicada debajo del arco magmático (Barrientos, 1980); (Barrientos, 1997).

FIGURA Nº 4-1 Principales cuencas del área de estudio



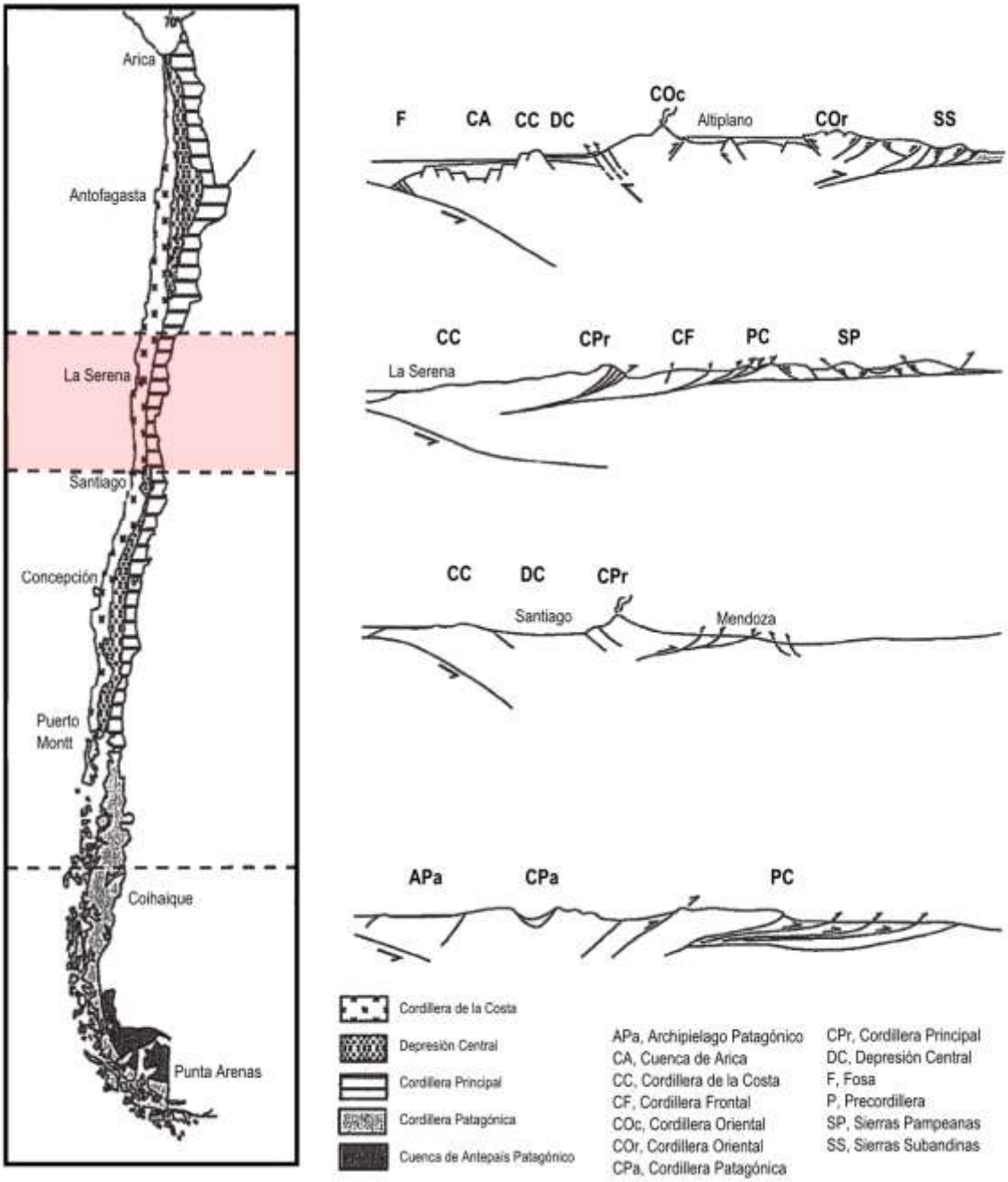
Fuente: Elaboración Propia

FIGURA Nº 4-2 Vista en 3D donde se representa el marco geodinámico, se aprecia la Dorsal de Juan Fernández y el lugar donde es subductada frente a los 33º S. La línea verde señala la fosa, lugar donde subducta la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, las flechas muestran las direcciones y velocidades de convergencia entre ambas placas



Fuente: Elaboración propia

FIGURA Nº 4-3 Segmentación Andina. Zona marcada en rosado corresponde a la zona de subducción plana



Fuente: (Charrier, et al., 2007)

4.3 *Marco Geológico*

La geología de la comuna de San Esteban está constituida por rocas con un rango de edades que van desde el Jurásico hasta el Mioceno, mientras que los depósitos no consolidados son producto de los procesos erosivos y depositacionales del Cuaternario (Thomas, 1967).

La geología del área de estudio (FIGURA Nº 4-4) se puede describir de manera general por rocas volcánicas y sedimentarias, marinas y continentales, que van desde el Jurásico inferior hasta el Cenozoico. Tanto las secuencias volcano-sedimentarias cretácicas como jurásicas se encuentran intruídas por pórfidos cenozoicos, cuya composición varía de gabros a granitos y con edades radiométricas que van desde el Mioceno Inferior al Mioceno Superior, decreciendo su edad desde oeste a este ((Thomas, 1967), (Rivano, 1991), (Rivano, et al., 1993)).

El Mesozoico aflora principalmente al oeste del área de estudio como secuencias sedimentarias y cuerpos intrusivos. Es importante notar el desarrollo de una zona de falla orientada norte-sur (FIGURA Nº 4-4), al este de la zona de falla se desarrollan toda la geología cenozoica, que consiste principalmente en una secuencia volcánica –sedimentaria e intrusivos de carácter batolítico que se hacen más jóvenes hacia el este. Esta Falla es conocida en la literatura como Falla Pocuro (Carter & Aguirre, 1965).

4.3.1 Unidades de Roca

4.3.1.1 Formación Las Chilcas (Barremiano-Turoniano)

La Formación Las Chilcas se ubica en un periodo geológico extenso (135 a 89 M.a). Esto se debe a que hay divergencia de opiniones en cuanto a la pertenencia del período geológico. Según Thomas (1958) la formación corresponde al Cretácico Superior (Turoniano), pero (Rivano, et al., 1986) la ubican en el Cretácico Inferior (Barremiano), siendo esta última la más certera ya que se usaron técnicas de datación radiométricas K/Ar de muestras de campo. Posteriormente se encontraron microfósiles en los niveles calcáreos y se le asignó una edad Albiano medio ((Gallego, 1994); (Martínez-Pardo, et al., 1994)). Esta edad es similar a las edades obtenidas por dataciones de U-Pb en circón de lavas y flujos piroclásticos que varían entre 109,6±0,1 y 106,5±0,2 Ma (Wall, et al., 1999) y a edades K/Ar de lavas que varían entre 101±3 y 95±3 Ma ((Gallego, 1994) ; (Wall, et al., 1999)).

La formación tiene un origen volcanoclástico y continental-lagunar. Las diferentes litologías que afloran generalmente corresponden a brechas, conglomerados, dimamicitas, volcarenitas, tobas y escasos niveles de lavas andesíticas. En algunas zonas de la formación encontramos dos partes diferenciadas, una donde predominan las Calcilutitas, Margas, Calizas Estromatolíticas y otra donde predominan los Mármoles.

Subyace en discordancia de erosión a la formación Lo Valle (Cretácico Superior). Se constata la existencia de un hiatus de ca. 20 Ma entre estas dos formaciones basándose en edades $^{40}Ar/^{39}Ar$ obtenidas en la zona al norte de Santiago. Sobreyace en concordancia a la Formación Veta Negra y se correlaciona hacia el norte con la Formación Quebrada Marquesa (Campbell, 2005).

Esta formación representa un arco volcánico subaéreo con intercalaciones aluviales continentales y en menor medida marinas. Las intercalaciones marinas se habrían depositado en una cuenca extensional, en un ambiente de plataforma carbonatada abierta hacia el oeste y que correspondería a una etapa terminal del ciclo transgresivo marino de una cuenca ensiálica marina del Albiano medio hasta el Albiano Superior (Campbell, 2005).

4.3.1.2 Formación Abanico (Oligoceno), (Aguirre, 1960)

Consiste en una serie de depósitos volcanoclásticos, lavas intgermedias a ácidas e intercalaciones sedimentarias aluviales, fluviales y lacustres, con un espesor aproximado de 2500m (Charrier *et al*., 1982).

Esta formación subyace a la Formación de Farellones. La naturaleza de este contacto es variable. En algunas zonas es discordante ((Aguirre, 1960); (Klohn, 1960); (Jaros, 1969), (Thiele, 1980); (Padilla, 1981); Moscoco *et al*. 1982; (Rivano, et al., 1990)),, en otras es concordante o pseudoconcordantes ((Godoy & Lara, 1994); (Godoy, et al., 1999)), y en algunas zonas se produce una transición gradual entre ambas formaciones ((Navarro, 2001)). Algunos autores señalan que la variabilidad de este contacto sería consecuencia de que la Formación Farellones se habría depositado durante y con posterioridad a la inversión de la cuenca en que se habría depositado la Formación Abanico ((Baeza, 1999); (Charrier, et al., 2002), en prensa). El contacto con las unidades mesozoicas subyacentes es por discordancia de erosión y en algunas localidades por la Zona de Falla Pocuro, como es el caso de la zona de estudio (Rivano, et al., 1993).

Es asignada a esta formación una edad entre el Eoceno medio a superior y el Mioceno inferior, basado en las edades radiométricas K/Ar y $^{40}Ar/^{39}Ar$ que se tiene de esta formación al sur del área de estudio ((Moscoso & Padilla, 1982); (Charrier, et al., 2002) ; (Gana & Wall, 1997); (Fuentes, et al., 2002), en prensa).

Los afloramientos designados a la Formación Abanico entre los 32º y 33ºS por algunos autores ((Aguirre, 1960); (Padilla, 1981); (Moscoso & Padilla, 1982); (SERNAGEOMIN, 2003)) son asignados sobre la base de relaciones estratigráficas por otros autores ((Rivano & Sepulveda, 1991); (Rivano, et al., 1993); (Rivano, 1996); (Díaz, 1996)) a las formaciones Los Pelambres y Salamanca de edad Cretácico Inferior y Cretácico Superior, respectivamente. (Rivano, 1996)señala que estas rocas se correlacionan hacia el norte con la Formación Los Pelambres y hacia el sur con la Formación Coya-Machali de edad oligoceno a Mioceno Temprano (Charrier *et al*., 1996).

Esta formación representa un volcanismo subaéreo continental con intercalaciones sedimentarias a ambientes lacustres de menor energía.

4.3.2 Depósitos No Consolidados

A continuación se presenta una descripción general de los depósitos no consolidados reconocidos en el área de estudio.

4.3.2.1 Depósitos de Terrazas continentales

Estos rasgos geomorfológicos corresponden según Rivano, et al. (1993) a los depósitos semiconsolidados existentes en el borde oriental del valle de San Felipe – Los Andes. Estas terrazas están formadas por arenas medias y conglomerados finos a medios. Presentan grandes escarpes de hasta decenas de metros de altura y podría estar correlacionado a escarpes de falla producto de la Zona de Falla de Pocuro. Se les asigna una edad Pleistoceno por relaciones estratigráficas con las rocas de la Formación Abanico.

4.3.2.2 Depósitos Aluviales de Valle (Pleistoceno-Holoceno)

Corresponden a sedimentos acumulados en las partes topográficamente más bajas de la depresión central. Los depósitos aluviales de valle están formados por sedimentos consolidados, estratificados y compuestos por gravas, areanas, limos y arcillas, y son disectados por el curso actual de los ríos mayores o de sus terrazas subactuales y llanuras de inundación.

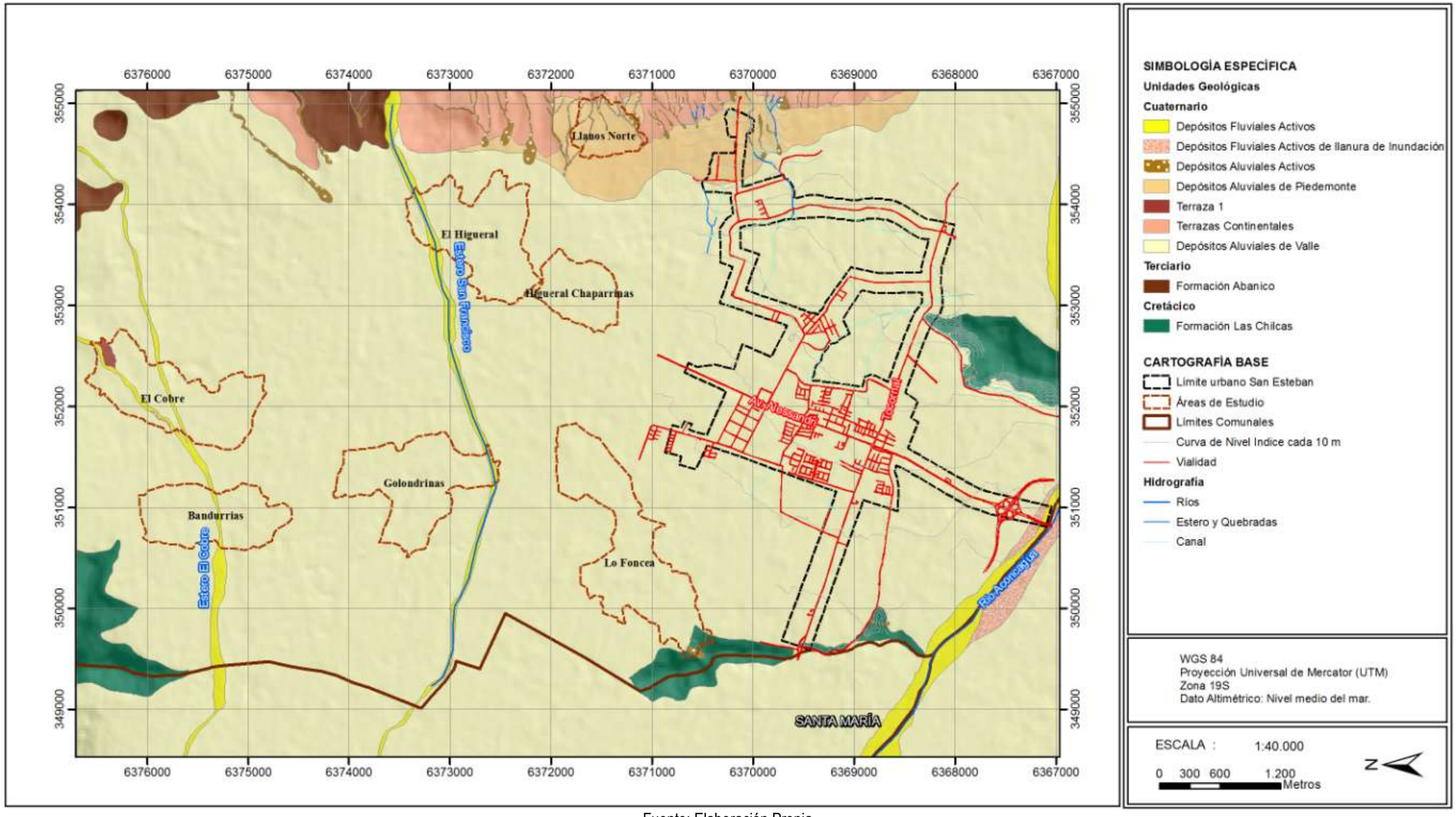
4.3.2.3 Depósitos Aluviales Activos y Aluviales de Piedemonte (Pleistoceno-Holoceno)

Corresponde a los sedimentos ubicados al pie de laderas, quebradas y cursos de aguas menores o efímeros, los que conforman conos de deyección. Estos depósitos están compuestos por bloques, gravas, arenas y, en menor cantidad, limos y arcillas. En general corresponden a sedimentos clasto-soportados, no consolidados y con mala estratificación. Las partes cercanas a la zona apical del abanico contienen un mayor porcentaje de sedimentos gruesos que en las partes distales y en algunos casos incluyen algunos depósitos matriz soportados asociados a flujos de barro y detritos.

4.3.2.4 Depósitos fluviales

Corresponden a depósitos reconocidos en las planicies fluviales cercanas a los cauces activos de los ríos. Están compuestas por bolones y gravas no consolidadas,redondeados a bien redondeados, clastosoportados y baja esfericidad. De manera ocasional se encuentra imbricados y son polimicticos, y asociados a lentes de arenas no consolidadas o limos finamente laminados.

FIGURA Nº 4-4 Mapa Geológico del área de estudio



Fuente: Elaboración Propia

4.4 *Marco Geomorfológico*

Para el análisis de los rasgos morfométricos del área de estudio, se elaboró un modelo digital de elevación (DEM por sus siglas en inglés). Para ello se utilizaron las curvas de nivel cada 2 m disponibles dentro del área urbana proporcionadas por el mandante y generadas a partir de la restitución aerofotogramétrica del 2002. La comparación y evaluación de distintos DEMs generados con los datos proporcionados concluyó en la utilización de un DEM de celdas de 1 m generado a partir de los datos topográficos de las curvas. A partir de esta información, se generaró una carta de elevaciones (FIGURA Nº 4-5), una carta de pendientes (FIGURA Nº 4-6), una carta de exposición de ladera (FIGURA Nº 4-7) y una de curvatura para el área de estudio.

El área de estudio se encuentra ubicada en la Cordillera Principal y la Depresión Central. Cada una de estas dos unidades morfoestructurales poseen características distintivas.

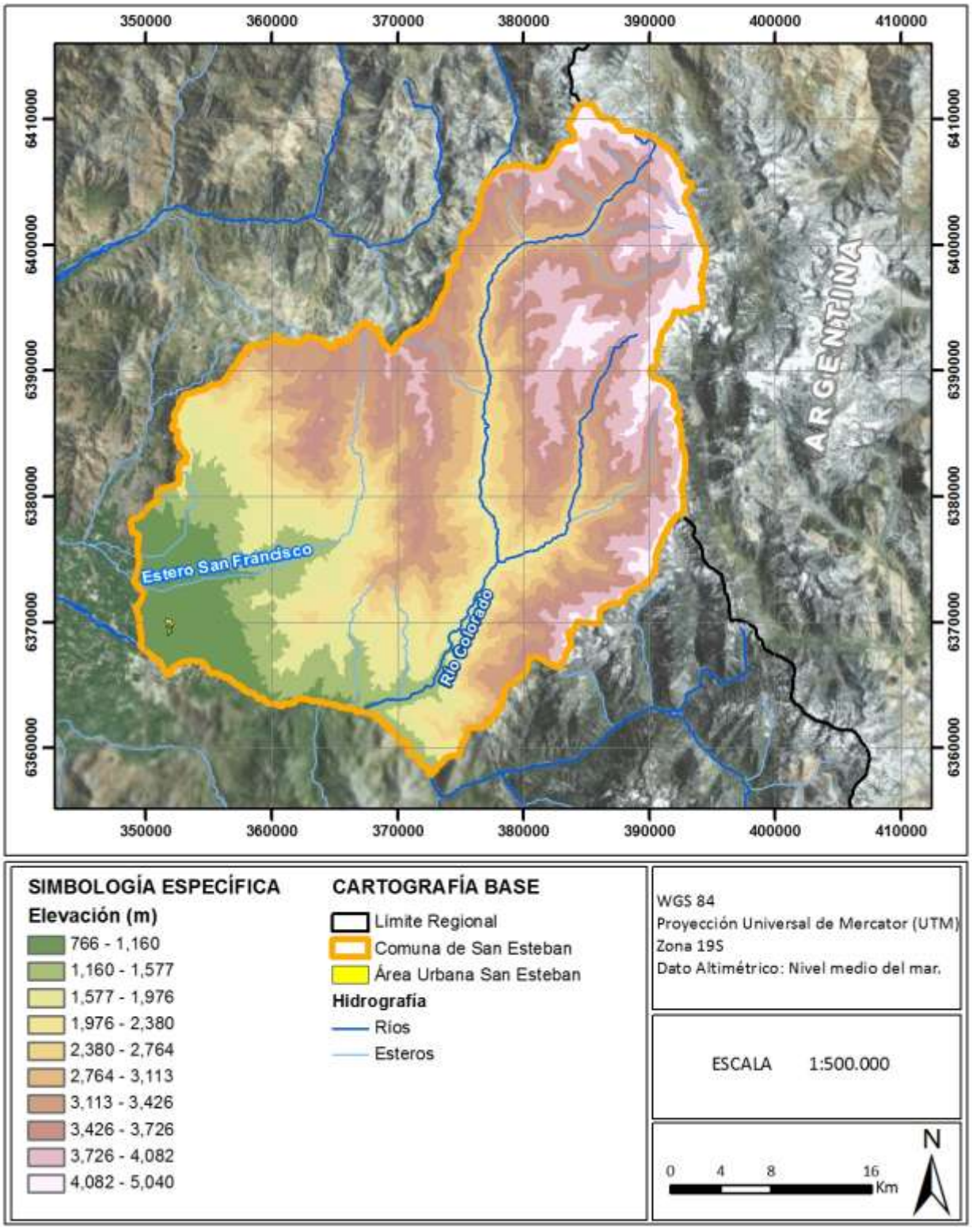
La Depresión Central comprende la zona de norte a sur de la comuna y se caracteriza por superficies de pendientes bajas (menores a 10º) que están formada mayormente por depósitos aluviales del río Aconcagua, el estero San Francisco y el estero del Cobre. Es en esta unidad donde se encuentra establecida la mayoría de la población y dónde está definida la zona urbana de San Esteban. Sus elevaciones están entre los 700 y 900 m s.n.m (FIGURA Nº 4-5).

La Cordillera Principal corresponde a la unidad de mayor relieve que se encuentra en la comuna, en esta unidad afloran las rocas volcánicas y sedimentarias del Mioceno que conforman la Cordillera. Comprende elevaciones entre los 900 y los 3900 m s.n.m. En esta zona las pendientes alcanzan valores altos, entre 15º y 70º (FIGURA Nº 4-6), y que localmente superan los 70º. En la Cordillera Principal se encuentran las cabeceras de los drenajes que desembocan en las áreas urbanas.

4.5 *Marco Hidrogeológico*

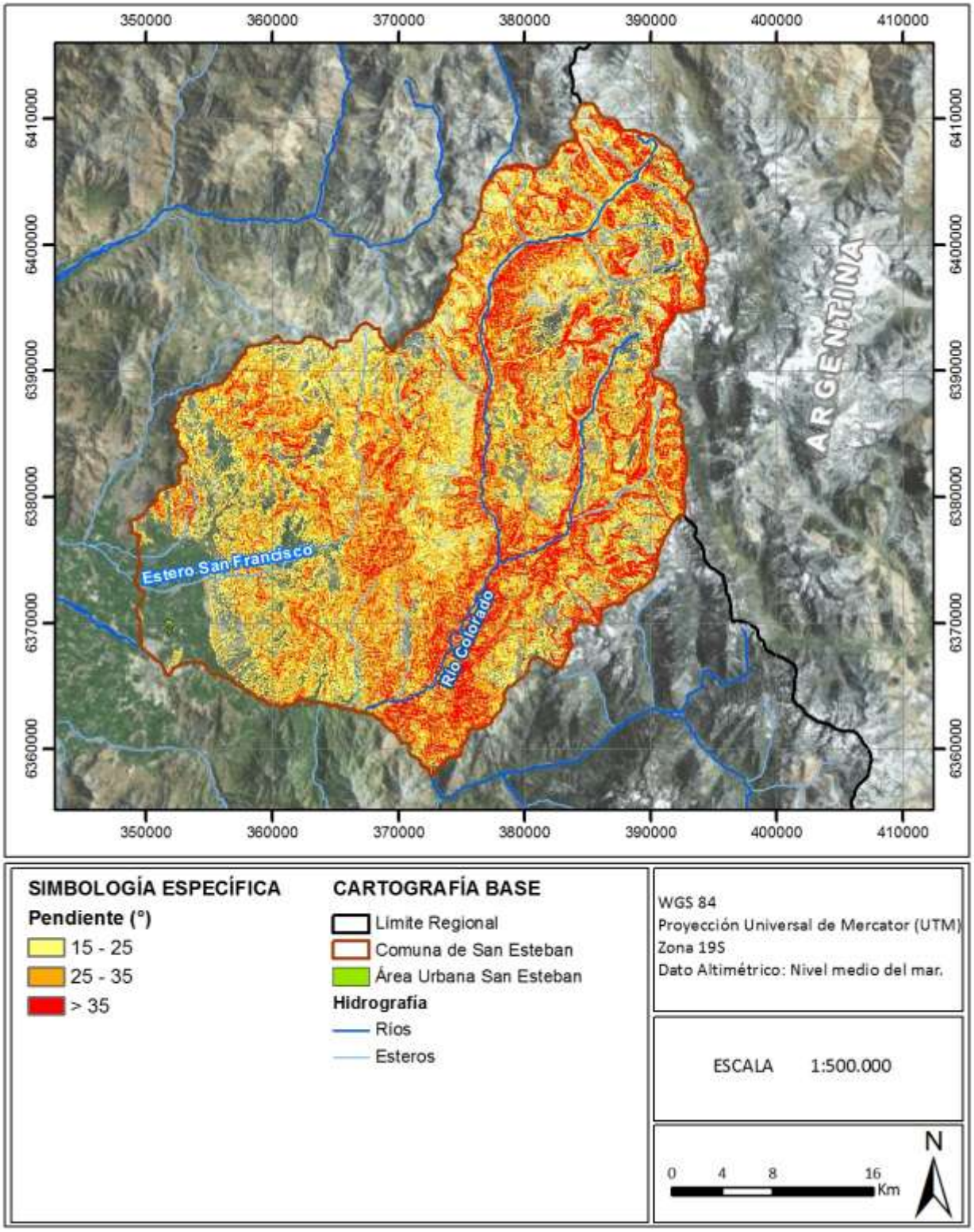
En el área de estudio los acuíferos más importantes reconocidos son los asociados a los depósitos sedimentarios del río Aconcagua. Y que han sido estudiados desde la década de 1960 (Ej. Moore (1969)) debido a la necesidad de agua para fines agrícolas.

FIGURA Nº 4-5 Carta de elevaciones de la comuna de San Esteban



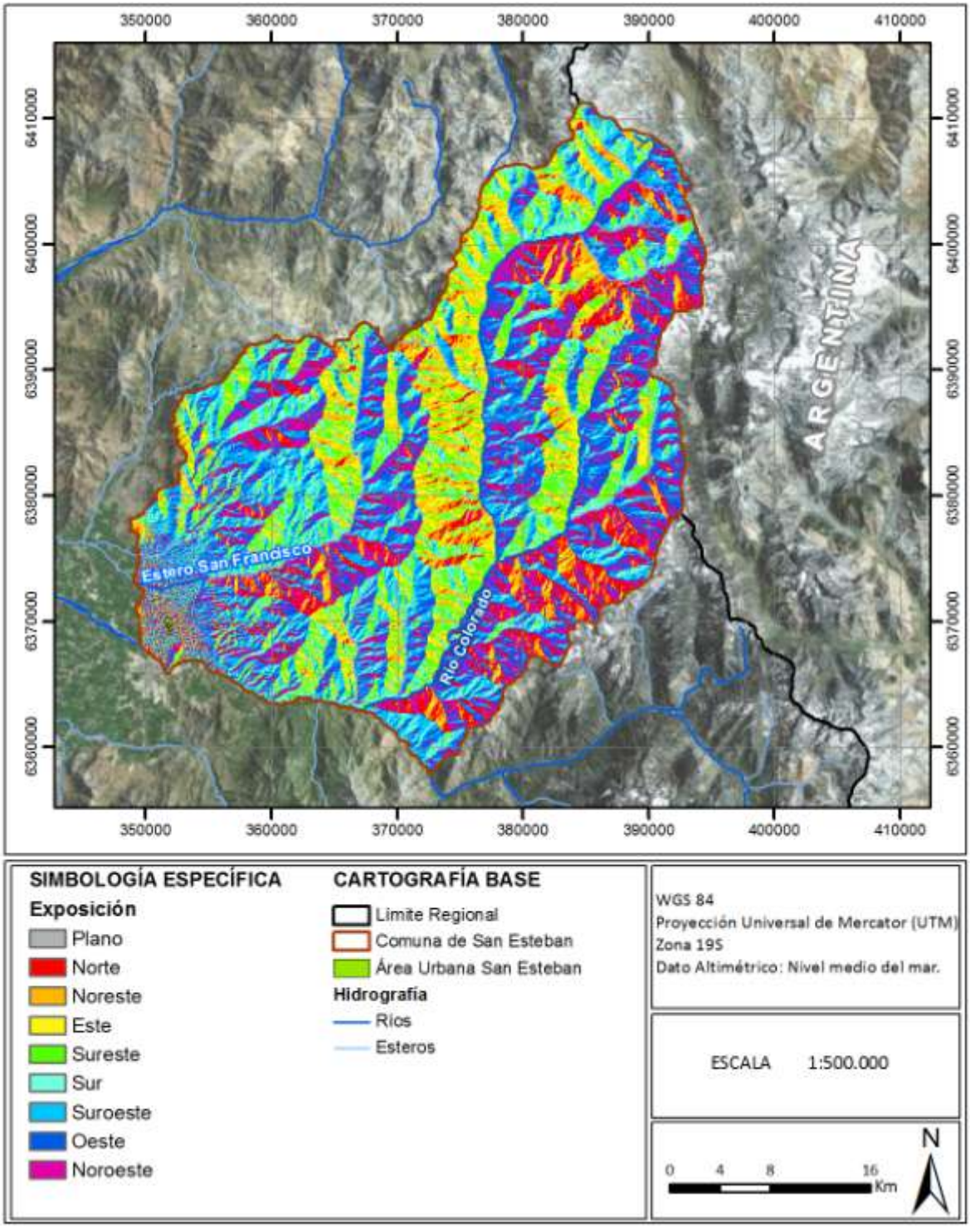
Fuente: Elaboración Propia en base a modelo ASTERGDEM

FIGURA Nº 4-6 Carta de pendientes de la comuna de San Esteban



Fuente: Elaboración Propia en base a modelo ASTERGDEM

FIGURA Nº 4-7 Carta de exposiciones de la comuna de San Esteban



Fuente: Elaboración Propia en base a modelo ASTERGDEM

5. INVENTARIO Y DIAGNÓSTICO PRELIMINAR DE PELIGROS GEOLÓGICOS

En base a la revisión bibliográfica, se realizó un inventario de peligros geológicos reconocidos en el área de estudio o en sectores cercanos a ésta.

Para el sector específico de la Comuna de San Esteban se conocen pocos antecedentes bibliográficos que den cuenta de un registro histórico de eventos geológicos tales como remociones en masa e inundaciones, sin embargo, existen referencias de sectores aledaños dentro de la Provincia de Los Andes, así como dentro de la Provincia de San Felipe, que dan indicios de las características de estos sucesos en torno a la cuenca del río Aconcagua, tal como se detalla a continuación.

5.1 *Remociones en Masa*

(Hauser, 2000), plantea la existencia de una interrelación entre lluvias de gran intensidad y la generación de remociones en masa, en particular de flujos de barros o detritos, en los ambientes andinos de Chile central. Las características de los eventos de remoción en masa que han sido inventariados y han ocurrido en la zona del Valle de Aconcagua, cercanos a la zona de estudio, no varían de lo establecido por este autor.

Dentro de los daños reportados por remociones en masa en el área cercana a la zona de estudio se incluyen daños a caminos interurbanos, camino internacional, a las vías férreas y pérdidas humanas.

A continuación se indican los eventos de remoción en masa que se han identificado a través de la bibliografía consultada, indicando los sectores que han sido afectados.

5.1.1 Flujo de Barro agosto 1987

De acuerdo a antecedentes recopilados, lluvias de gran intensidad entre 185 y 148 mm en 24 horas entre los días 13 y 18 de agosto de 1987, provocaron remociones en masa del tipo flujo de barro en el flanco sur del valle del río Juncal, aguas abajo de Guardia Vieja, en la Comuna de Los Andes (FIGURA Nº 5-1). El día 18 de Agosto, a las 18:30 horas, el camino internacional a Argentina fue bloqueado por un flujo de barro que movilizó bloques de hasta 450 toneladas. La saturación coluvial en el sector resultó determinante para desencadenar la remoción, que en torno a su coronamiento, comprometió un deslizamiento multirotacional (Hauser, 1987).

FIGURA Nº 5-1 Flujo de barro ocurrido en el sector de Guardia Vieja, flanco sur río Aconcagua el 18 de Agosto de 1987).



Fuente: (Hauser, 2000)

5.1.2 Flujo detrítico, febrero 1980.

Precipitaciones inusualmente intensas durante los días 21 y 22 de febrero de 1980 en la zona andina a la altura de la Región Metropolitana, desencadenaron numerosos flujos detríticos que se encauzaron en quebradas secas de los valles principales y en afluentes de los ríos Aconcagua y Mapocho. Uno de los flujos destacados en el valle de Aconcagua es el ocurrido en el sector de Puntilla del Viento (FIGURA Nº 5-2) y los Azules, con lluvias superiores a 60mm en 24hrs (Hauser, 2000). (Urrutia & Lanza, 1993), describen que este temporal de lluvia provocó un aluvión a ocho kilómetros de San Esteban, cerca de Los Andes, en un campamento donde se encontraban durmiendo un grupo de personas. Se desprendieron barro y piedras en el camino de Los Andes a Mendoza, quedando aislados cerca de doscientos automóviles.

FIGURA Nº 5-2 Flujo detrítico ocurrido en el sector de la Puntilla del Viento el 21 de febrero de 1980)



Fuente: Hauser, 2000.

5.1.3 Flujo de barro y detritos, 3 de Mayo de 1993

La situación vivida el día lunes 3 de mayo de 1993 fue producto de una lluvia intensa por sobre la línea de nieves de la zona cordillerana. La precipitación líquida que generalmente cae por debajo de los 2.800 mts. aproximadamente en la cordillera de la zona central, experimentó ese día un ascenso hacia los 3.800 mts. debido al alza de la temperatura producto del frente cálido que en ese momento generaba precipitaciones entre las Regiones de Coquimbo y El Maule.

El aluvión que bajó por la Quebrada de Macul, fue definida en ese momento como una sedimentación (depositación de materiales fluviales) violenta y súbita. Dicho proceso de arrastre de materiales diversos (agua, piedras, tierra, troncos, etc) se debió a la gran cantidad de agua lluvia que se concentró en todos los colectores naturales que tributan aguas a dicha quebrada, situación que también se registró en la Quebrada de San Ramón, la que descarga sus aguas en los canales Las Perdices y San Carlos.

El área cubierta por la precipitación líquida caída por encima de la línea normal de nieves aumentó el área de escurrimiento regular de la cuenca, aportando mayor cantidad de agua en sus causes que la que comúnmente fluye. Esta precipitación fusionó grandes cantidades de nieve, la que una vez liquida y sumada al la lluvia generaron un inusual aumento de caudal. La magnitud del caudal generado afectó zonas de suelo desnudo erosionándolo más aún. Este proceso se multiplicó en toda la zona descubierta de vegetación, aumentado de esta forma la cantidad de sólidos en cada curso de agua, los que

finalmente se transformaron, en algunos casos, en violentos torrentes que adquirieron gran velocidad y volumen debido a la pronunciada pendiente, arrastrando los elementos que se interpusieron en su paso.

La masa de lodo, rocas y otro tipo de materiales decantó en la zona plana inmediatamente después de abandonar la pendiente precordillerana, dejando paso solo al flujo de agua que continuó escurriendo hasta perder energía.

La zona afectada por las intensas precipitaciones comprendió de norte a sur a las cuencas de los ríos Juncal y Colorado en la Región de Valparaíso. Las cuencas de los ríos Mapocho y Maipo (cuencas mayores) y la de las quebradas de San Ramón y Macul (cuencas menores) en la Región Metropolitana. En la Región de O'Higgins fueron afectadas las cuencas del estero Codegua y río Cachapoal.

Las intensas precipitaciones también provocaron daños en la Ruta Internacional Los Andes-Mendoza por el aumento de caudal de los ríos Juncal y Colorado, interrumpiendo el transito por esa ruta dejando aisladas a localidades de las Comunas de Los Andes y San Esteban.

5.1.4 Flujo de barro y detritos, diciembre 1995.

Lluvias que totalizaron tan sólo 9,3 mm en 3 horas, ocurridas el día 27 de diciembre de 1995 en un segmento del río Blanco, quinta región, provocaron voluminosos y enérgicos flujos de barro y detritos. Estas lluvias causaron daños materiales en los caminos de acceso a las faenas mineras, colapso del ducto para el transporte de concentrado y relaves, bloqueo instantáneo del escurrimiento del río Blanco y problemas operacionales en el tranque Los Leones (FIGURA Nº 5-3).

5.1.5 Deslizamientos de bloques rocosos.

En el año 1944, a causa de un fuerte temporal en el sector que se encuentra entre Los Andes y Curimón un rodado de más de dos mil metros cúbicos interrumpió el camino. También indican que varios rodados dejaron vehículos bloqueados en los caminos cercanos a San Felipe (Urrutia & Lanza, 1993).

En el Alto Aconcagua se observan claras remociones asociadas a deslizamientos de bloque rocosos que se han identificado en el flanco oriental del valle del río Blanco, frente a Saladillo, en la V región (Hauser, 2000).

FIGURA Nº 5-3 Canalón excavado por flujo detrítico. Valle del río Blanco. El flujo detrítico sucedió el 27 de diciembre de 1995.



Fuente: Hauser, 2000.

5.1.6 Avalanchas (Aludes)

En Septiembre de 1907 una gran nevazón en la cordillera ocasionó una avalancha sobre la aduana de Juncal. Murieron cinco personas que vivían en la zona, además bloques de nieve obstruyeron también el paso del ferrocarril que solo pudo llegar hasta río Blanco, interrumpiendo inclusive las comunicaciones telegráficas (Urrutia & Lanza, 1993).

El día 17 de agosto de 1951 una avalancha destruyó parte de la estación de trenes Caracoles del Ferrocarril Transandino. Ésta comprometió la vida de 6 personas. (Diario "El Mercurio", 20 de agosto de 1951).

El día 11 de agosto de 1965, una avalancha que se desencadenó a las cinco de la madrugada, destruyó un edificio en el sector de Portillo, V región, causando la muerte de 5 esquiadores (Golubev, 1967).

5.1.7 Derrumbes de Montañas

Esta designación "Derrumbes de Montañas" que se asocian a voluminosas remociones prehistóricas (Abele, 1984), se han detectado en los alrededores de Portillo, en la hoya del río Aconcagua (Hauser, 2000).

5.2 *Inundaciones Terrestres*

Hasta la fecha no se han encontrado antecedentes que registren inundaciones asociadas al rio Colorado y estero San Francisco que corresponden a los principales cursos de agua de la comuna de San Esteban. Los únicos antecedentes disponibles indican que las principales inundaciones se asocian al río Aconcagua y que han afectado a las comunas aledañas al área de estudio.

En el Estudio Complementario para la Formulación del Plan Regulador Intercomunal de Aconcagua, provincias de San Felipe y Los Andes (Universidad Católica de Chile, 1999), se señala que el río Aconcagua presenta generalmente sus mayores caudales en verano, producto de los deshielos, especialmente en su curso superior; no obstante, las crecidas más importantes han sido de origen pluvial y se han originado como producto de lluvias con línea de nieve alta.

En el
CUADRO Nº 5-1 se muestran las principales crecidas en el período 1973-1993, obtenidas desde el informe de MOP-CONAF (1995).

Si se observa el cuadro anterior, vemos que en el año 1993 se producen las crecidas más importantes para la parte alta de la cuenca, y en el año 1987 se producen en los sectores de la parte baja de la cuenca.

En el estudio de riesgos de la Universidad Católica (1999) se llega a la conclusión de que los principales problemas ocasionados por las crecidas de los cauces naturales principales de la cuenca del río Aconcagua se dan en las zonas ribereñas, causando importantes daños provocados por inundaciones y/o erosión de riberas, afectando sectores poblados y áreas agrícolas.

De acuerdo a lo observado en el CUADRO Nº 5-2 y según el trabajo de la Universidad Católica (1995), los sectores más afectados por las crecidas del río Aconcagua corresponden a las zonas cercanas a San Felipe, causando daños a caminos interurbanos, y/o problemas en la ruta internacional. La ocupación de las planicies de inundación de estos cauces por asentamientos humanos o por construcción de infraestructura vial, son las causas principales de los problemas derivados por las inundaciones.

Otra causa de las inundaciones que hace referencia a la reducción de la capacidad de algunos cauces por embancamientos, canalizaciones y obras de cruce de dimensiones insuficientes (Universidad Católica de Chile, 1999).

En el CUADRO Nº 5-3 se hace mención a los sectores que resultan con problemas por inundaciones del río Aconcagua.

CUADRO Nº 5-1 Principales crecidas en los períodos 1973-1993 en las áreas aledañas a la zona de estudio

Fecha	Caudal Máximo Instantáneo (m3/s)						
	Aconcagua *Chacabuquito*	Aconcagua *San Felipe*	Aconcagua *Romeral*	Aconcagua *Calera-Quillota*	Marga-Marga *Viña del Mar*	Estero Quilpue *Desembocadura*	Putaendo *Resguardo de los Patos*
05/93	783	1.110	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D
07/87	224	383	700	900	700	S/D	138
06/86	256	375	700	S/D	S/D	S/D	52
07/84	44	140	420	1.100	577	152	S/D
06/82	200	S/D	700	1.050	387	78	115
07/77	303	420	650	1.150	S/D	S/D	698

Fuente: MOP-CONAF, 1995.

CUADRO Nº 5-2 Inventario de inundaciones y temporales históricos del valle del Alto Aconcagua

Fecha	Observaciones	Año ENSO
Mayo 1748	Desborde del río Aconcagua. Se desbordó en los primeros días de mayo. Llevándose un puente en construcción, obra llevada a cabo para dar auge a San Felipe.	X
1878	Temporal que afecta la línea férrea de Los Andes. Esta queda cortada a la altura de Curimón	X
1888	Temporal que causa desborde del río Aconcagua. El río se lleva una parte de los terraplenos a la altura de Curimón.	X
1899	Temporal que provoca inundaciones por crecidas del río Aconcagua. Daños en San Felipe.	X
Julio 1900	Temporal que destruye parte del puente Ratuco, ubicado en las confluencias del mismo nombre, con el río Aconcagua. El puente Curimón, ubicado entre San Felipe y Curimón, también es dañado, cortando la línea del tren.	X
Agosto 1920	Temporal causa fuertes nevazones que afectaron principalmente Los Andes y San Felipe.	X
1934	El río Aconcagua provoca anegamientos en varios sectores de San Felipe, y sectores del Juncal, Portillos y Caracoles quedan aislados.	

Fecha	Observaciones	Año ENSO
Enero 1944	Temporal causa inundaciones en San Felipe, llegando a algunos sectores el agua a más de 50cm de alto, prácticamente todas las casas se anegaron, el hospital quedó totalmente dañado con filtraciones incluso en el techo. Varios rodados dejaron vehículos bloqueados en los caminos cercanos a San Felipe. En el camino entre Los Andes y Curimón un rodado de más o menos de dos mil metros cúbicos interrumpió el camino. Cuatro personas perecieron ahogadas en el río Aconcagua cerca de Curimón.	
Diciembre 1972	A causa de deshielos la zona se ve afectada por crecida de ríos Aconcagua y Putaendo. Los cuales arrasaron con casas, cultivos, cortaron caminos y puentes. San Felipe y Los Andes fueron declaradas zonas de catástrofe. El camino a Mendoza quedó interrumpido.	X
Mayo 1973	Temporal de lluvia y vientos huracanados que duró varios días. Entre una de las provincias más damnificadas se encontraba la de Aconcagua. En la quedaron muchas familias con sus viviendas anegadas, sin techo y con mobiliario y enseres destruidos.	X
Julio 1977	Temporal de lluvia deja aisladas a centenares de personas en Portillo. Hubo daño en el camino de Los Andes a Caracoles.	X
Julio 1978	Temporal de lluvia deja personas aisladas en el sector de Portillo	
1993	Mayores crecidas del río Aconcagua en el período 1973-1993, en los sectores de la parte alta de la cuenca, particularmente en Chacabuquito y San Felipe.	

Fuente: Elaboración propia basado en Urrutia y Lanza, 1993; MOP-CONAF, 1995; y (Ortlieb, 1994).

CUADRO Nº 5-3 Sectores críticos y problemas de inundaciones en el sector alto del río Aconcagua

N°	Cauce y sector	Problema y consecuencias	Causas
1	Río Aconcagua y Juncal Sector Los Andes –Ojos de Agua (L=45 Km.)	Erosión de ribera. Inundación de zonas ribereñas. Infraestructura afectada: 11 Km. de terraplenes y puentes del camino Internacional. Población afectada: usuarios de la vía.	-Localización de la vía próxima al cauce en zonas sujetas a erosión y/o inundación
2	Río Aconcagua Sector urbano de la ciudad de San Felipe (L=2 Km.)	Socavación e inundación sobre ribera derecha, afecta a población La Copa. Área afectada: 7 manzanas/175 viviendas Población afectada: 900 personas	-Ocupación de planicies de inundación -Cercanía de instalaciones a riberas erosionables
3	Sector río Putaendo	Inundación sectores agrícolas y zonas rurales aledañas al cauce del río Putaendo	-Ocupación de planicies de inundación
4	Río Aconcagua Sector Los Andes (L=2 Km)	Inundación de sectores peri-urbanos. Tramo puente David García-Bocatoma canal Rinconada Área afectada: 100 vivienda Infraestructura afectada: 200 m de vía férrea Población afectada: 500 personas	-Ocupación de planicies de inundación
5	Río Aconcagua Sector Panquehue-San Roque (L=2 Km)	Erosión de ribera izquierda que afecta terrenos agrícolas del sector Panquehue y San Roque Área afectada: 15 há./75 viviendas rurales Población afectada: aprox. 450 personas	-Ocupación de planicies de inundación
6	Río Aconcagua Sector Tres Esquinas-San Rafael (L=9Km)	Erosión de riberas e inundación de terrenos agrícolas aledaños al cauce en sector Tres esquinas, cruce Rinconada y sector San Rafael con riesgo de daño a Ruta CH-60 Área afectada: 76 há. Infraestructura afectada: Ruta CH-60 en aprox. 1 Km. Población afectada: aprox. 400 personas.	-Ocupación de planicies de inundación con cultivos agrícolas, viviendas e infraestructura vial.

Fuente: MOP-CONAF, 1995.

5.3 *Sismicidad*

5.3.1 Antecedentes Históricos

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

Por las condiciones geológicas de Chile, históricamente ha sido afectado por grandes terremotos.

El área de estudio presenta antecedentes históricos que indican que ha sido afectada por grandes terremotos intraplaca de profundidad intermedia, tales como los de 1965 y 1971, y terremotos interplaca tipo thrust, por ejemplo, los terremotos 1647, 1730, 1873, 1906 y 1985 (Lara & Rauld, 2003), tal como se observa en la FIGURA Nº 5-4.

También sismos de magnitud cercana a 7, con características de terremoto han afectado a la zona, como por ejemplo el de 1822.

Los principales eventos que han afectado al área de estudio se presentan en el CUADRO Nº 5-4.

El registro histórico de sismos interplaca e intraplaca de profundidad intermedia se detallan a continuación. La recopilación de estos datos se obtuvieron desde (Urrutia & Lanza, 1993) y (Petit-Breuilh, 2001).

Los eventos anteriores al de 1730 tienen registros imprecisos y escasos, por lo que no serán detallados dentro de este análisis.

El registro histórico de los principales sismos interplaca ocurridos éntrelos 29° y 34° S se detalla a continuación.

- **Terremoto de Diciembre de 1647:** El río de Aconcagua quedó seco en la desembocadura, y Quillota quedó destruida.

- **Terremoto de 22 de Julio de 1687:** De intensidad aproximada de VII. Su epicentro se ubica entre San Felipe y La Ligua, con latutid entre los 32º y 34º sur. Daños en convento en San Felipe y daños en Santiago.

- **Terremoto del 8 de Julio de 1730 (M ≈ 8.9)**: Es considerado uno de los mayores sismos que han afectado el territorio de Chile, con magnitud estimada entre 8.5 y 9. Produjo daños entre La

Serena-Coquimbo y Chillán. Grandes daños en San Felipe, TilTil y Renca. Y un maremoto que afecto la zona centro y sur de Chile.

- **Terremoto del 10 de Noviembre de 1822:** Sismo que fue sentido desde Illapel hasta Chiloé. Valparaíso y Quillota fueron afectados, falleciendo en la primera 66 personas.

- **Terremoto del 7 de Julio de 1873:** El terremoto afectó la zona central del país produciendo los mayores daños en Petorca, la Ligua y los alrededores.

- **Terremoto del 16 de Agosto de 1906 (M=8.2):** El epicentro de este terremoto se ubicó entre Limache y Valparaíso. Hubo más de dos mil personas fallecidas. En San Felipe se destruyeron la mayor parte de las construcciones de la hacienda Panquehue. Hubo levantamientos de terreno en la costa.

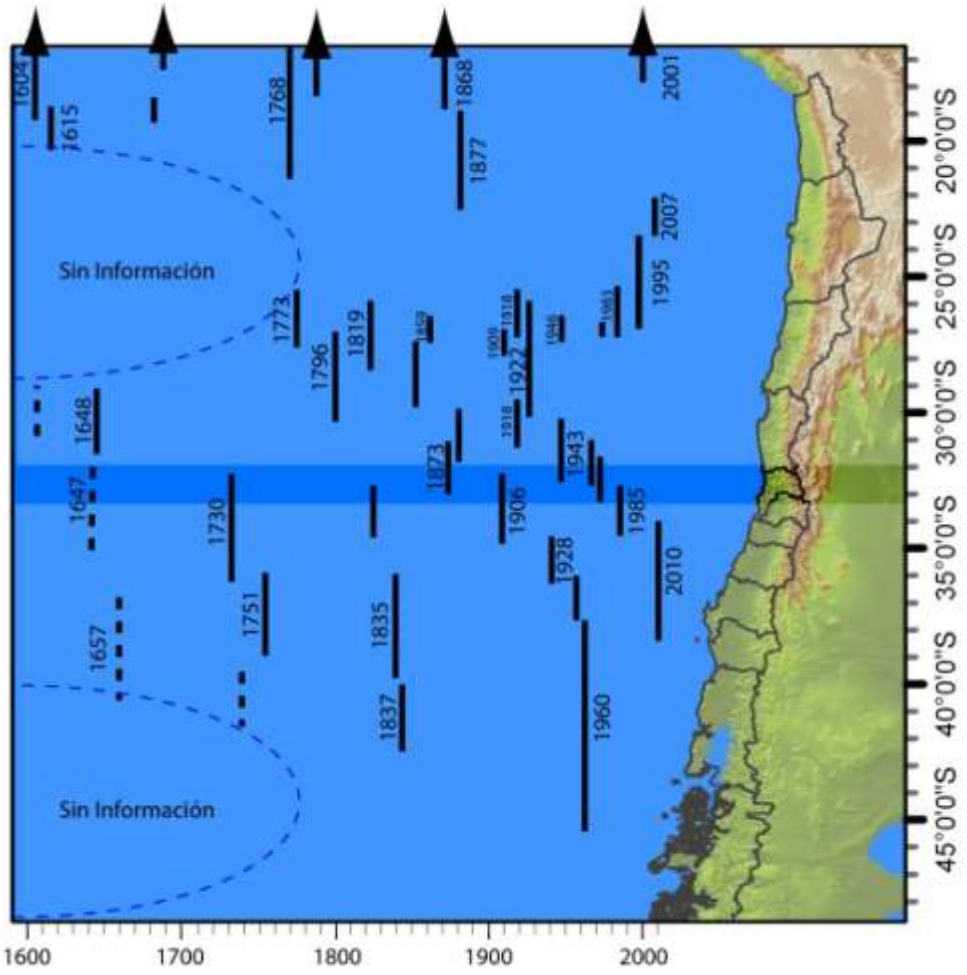
- **Terremoto del 14 de Abril de 1927:** Terremoto de intensidad IX. El epicentro fue entre los volcanes Tupungato y Aconcagua. Las zonas afectadas fueron Santiago, San Felipe, Los Andes, Mendoza. El sismo produjo grandes daños, pérdidas humanas y heridos.

- **Terremoto del 28 de Marzo de 1965 (M =7.6):** El epicentro se encontró en la comuna de la Ligua, a los treinta y dos grados y treinta y tres segundos latitud sur y setenta y un grado y diez minutos de longitud. La profundidad del foco fue de 50 a 60 km. Hubo 87 muertos, centenares de heridos y doscientos desaparecidos bajo el aluvión del tranque de relave de la mina El Soldado. En San Felipe hubo daños en las viviendas. En Curimón los daños se dieron en construcciones, y en Los Andes, hubo pérdida humana y varios heridos, destrucción de viviendas, interrupción en el suministro de agua potable a causa del desmoronamiento del canal Huertadino, en Los Azules. En los poblados de Rinconada y Calle Larga se destruyeron decenas de casas antiguas y hubo dos muertos en la primera.

- **Terremoto del 8 de Julio de 1971 (M =7.75**): Afectó principalmente las zonas de Coquimbo, Aconcagua, Valparaíso y Santiago. El epicentro se ubicó en los treinta y dos grados y veintisiete minutos de latitud sur y setenta y un grado treinta y cuatro minutos de longitud. La profundidad fue de sesenta km. En San Felipe hubo destrucción de construcciones, tres muertos y quince heridos. En Los Andes también hubo daño de estructuras y un muerto y varios heridos.

- **Terremoto del 3 de Marzo de 1985 (M =7.7):** El movimiento se sintió desde la III y IX región. Su epicentro se ubicó en la latitud treinta y tres grados, catorce minutos y veinticinco segundos, y longitud de setenta y dos grados, dos minutos y veinticuatro segundos. Con este terremoto hubo destrucción de viviendas que causaron víctimas fatales, destrucción de pavimentos, caída de puentes.

FIGURA Nº 5-4 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

CUADRO Nº 5-4 Datos de terremotos históricos de magnitud superior a 7.5 ocurridos en la zona.

Latitud (º)	Longitud (º)	Profundidad (Km)	Magnitud Aprox.	Año	Mes	Día
-33.05	-71.63	-	8.9	1730	07	07
≈ -33	-	25	8.2	1906	08	16
-32.01	-71.17	50 a 60	7.6	1965	03	28
-32.45	-71.57	60	7.7	1971	07	08
-33.24	-72.04	33	7.7	1985	03	03

Fuente: Elaboración propia en base a Catálogo NEIC

Los terremotos ocurridos en Chile previamente al año 1960 no fueron registrados mediante sismómetros modernos, por lo que no poseen información instrumental que permita determinar sus características. Por lo tanto, las áreas de ruptura de los terremotos previos a dicha fecha han sido estimados en otros estudios utilizando los datos históricos de intensidad de daño mediante la metodología propuesta por (Kausel, 1992).

5.3.2 Sismos registrados por la red sismológica mundial.

En la FIGURA Nº 5-5 se presenta la sismicidad registrada por la red sismológica internacional, con magnitudes superiores a 3 entre los años 1973 y 2010.

De la distribución de los sismos es posible realizar una serie de observaciones respecto a la distribución espacial de la sismicidad entre los 29ºS y los 34ºS.

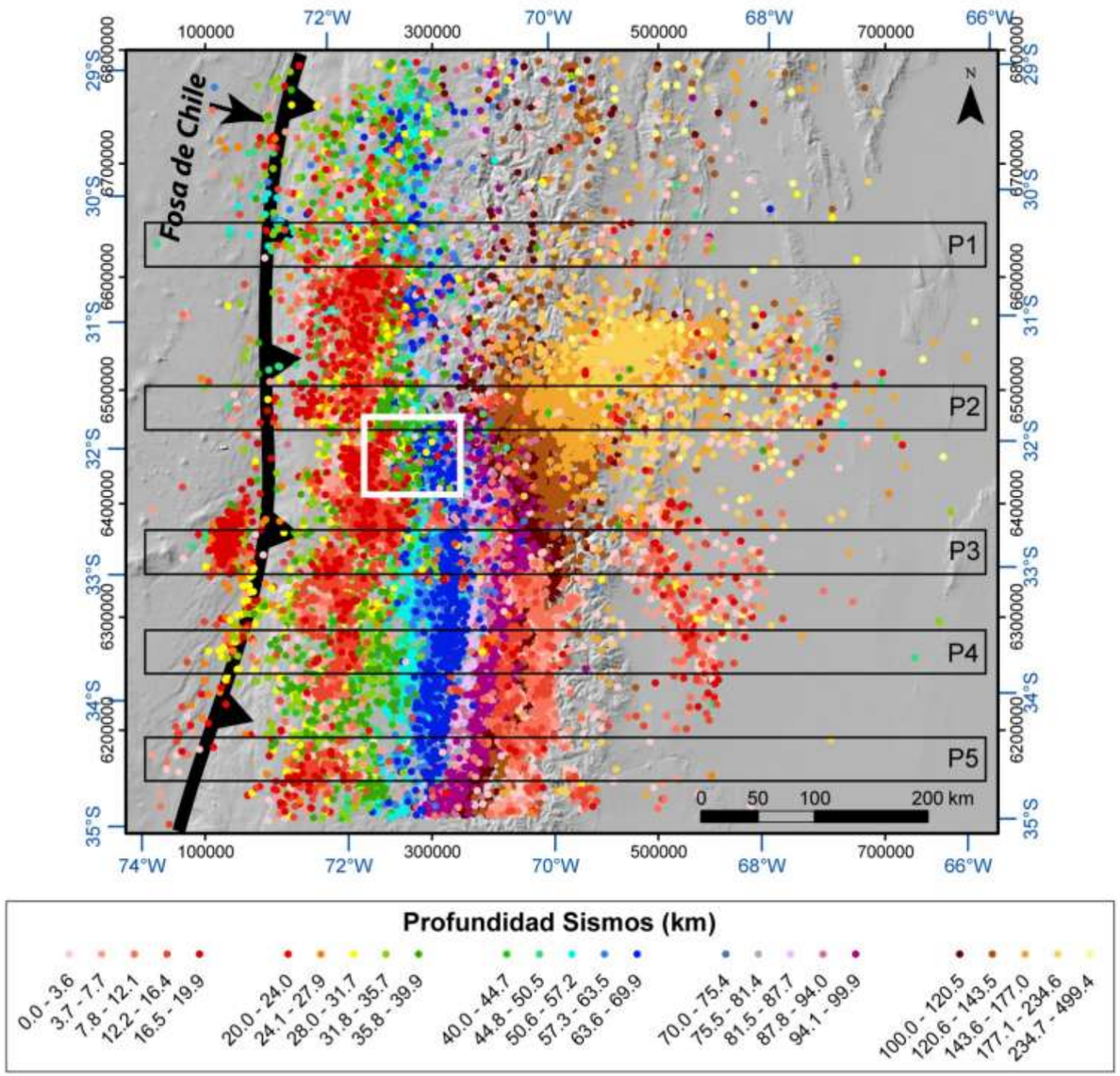
1. La mayor parte de la sismicidad se dispone en una línea paralela a la costa y en los primeros 30 km de profundidad. Esta sismicidad es la que se produce en la interfaz de subducción (sismos interplaca) y prácticamente no muestra variaciones latitudinales. Ejemplo de este tipo de sismos es el ocurrido en 1985 cuya profundidad y magnitud fueron de 33 km y MW = 7.7 respectivamente.

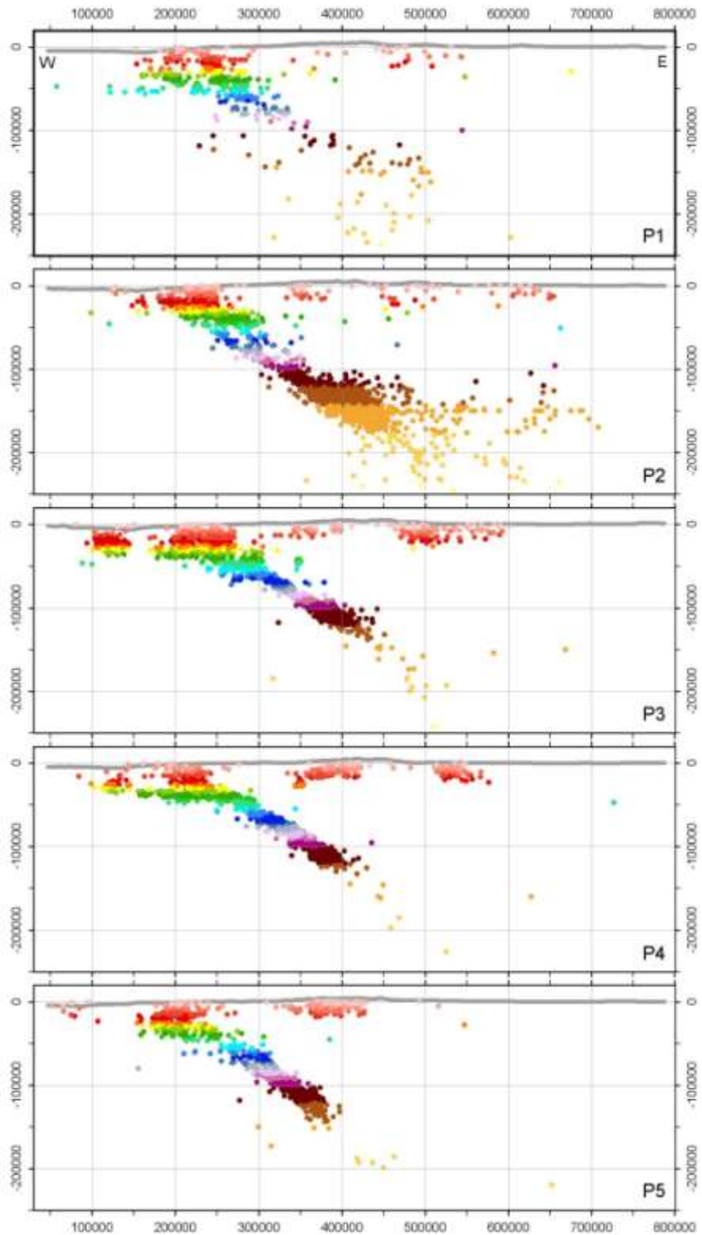
2. Al sur de los 31ºS hay una gran cantidad de sismos ubicados bajo los 60 km, estos son los sismos intraplaca de profundidad intermedia. En el área de estudio, se aprecia un aumento de esta actividad sísmica, por lo que se debe tener en cuenta que existe una probabilidad más alta de ocurrencia en esta zona de sismos de tales características, en comparación a las zonas que se ubican al norte de los 31ºS. Ejemplos de estos sismos son los de 1965 y 1971, los cuales tuvieron profundidades entre los 50 y 60 km, y magnitudes MW = 7.6 y MW = 7.7 respectivamente y que afectaron fuertemente la zona en estudio.

3. Desde los 32º S hacia el sur en la figura se aprecia una gran cantidad de eventos sísmicos superficiales, de profundidad menor a 20 km, en la zona cordillerana que están asociados a los procesos de deformación actualmente activos.

Se observa que la región que enmarca la zona de estudio se encuentra regida por diferentes tipos de sismos, de intraplaca de profundidad intermedia, interplaca y superficiales, los cuales denotan la dinámica que se ejerce en la interacción de ambas placas, en la cual una subducta a la otra.

FIGURA Nº 5-5 Mapa regional con la sismicidad registrada entre 1973 y 2010 del Catálogo NEIC, junto a perfiles de la sismicidad. El área de estudio se ubica aproximadamente al centro de la figura.





Fuente: Elaboración propia

5.3.3 Principales fuentes sísmicas reconocidas en el área de estudio.

En el área de estudio se reconocen tres fuentes sismogénicas principales, que son: interplaca, intraplaca de profundidad intermedia y eventos corticales superficiales (ver FIGURA Nº 3-3 en el Capítulo 3.1.13.1 Sismicidad).

5.3.3.1 Sismos Interplaca tipo Thrust

Corresponden a aquellos eventos que se producen en el contacto entre las placas de Nazca y Sudamericana. Este tipo de eventos alcanzan grandes magnitudes. Ejemplos de estos sismos que han afectado fuertemente a la zona del presente estudio corresponden a los de 1906 y 1985. Cuyas magnitudes fueron de MW = 8.2 y MW = 7.7 respectivamente. Esta zona por lo tanto, se considera una fuente activa que puede generar terremotos destructivos en la zona.

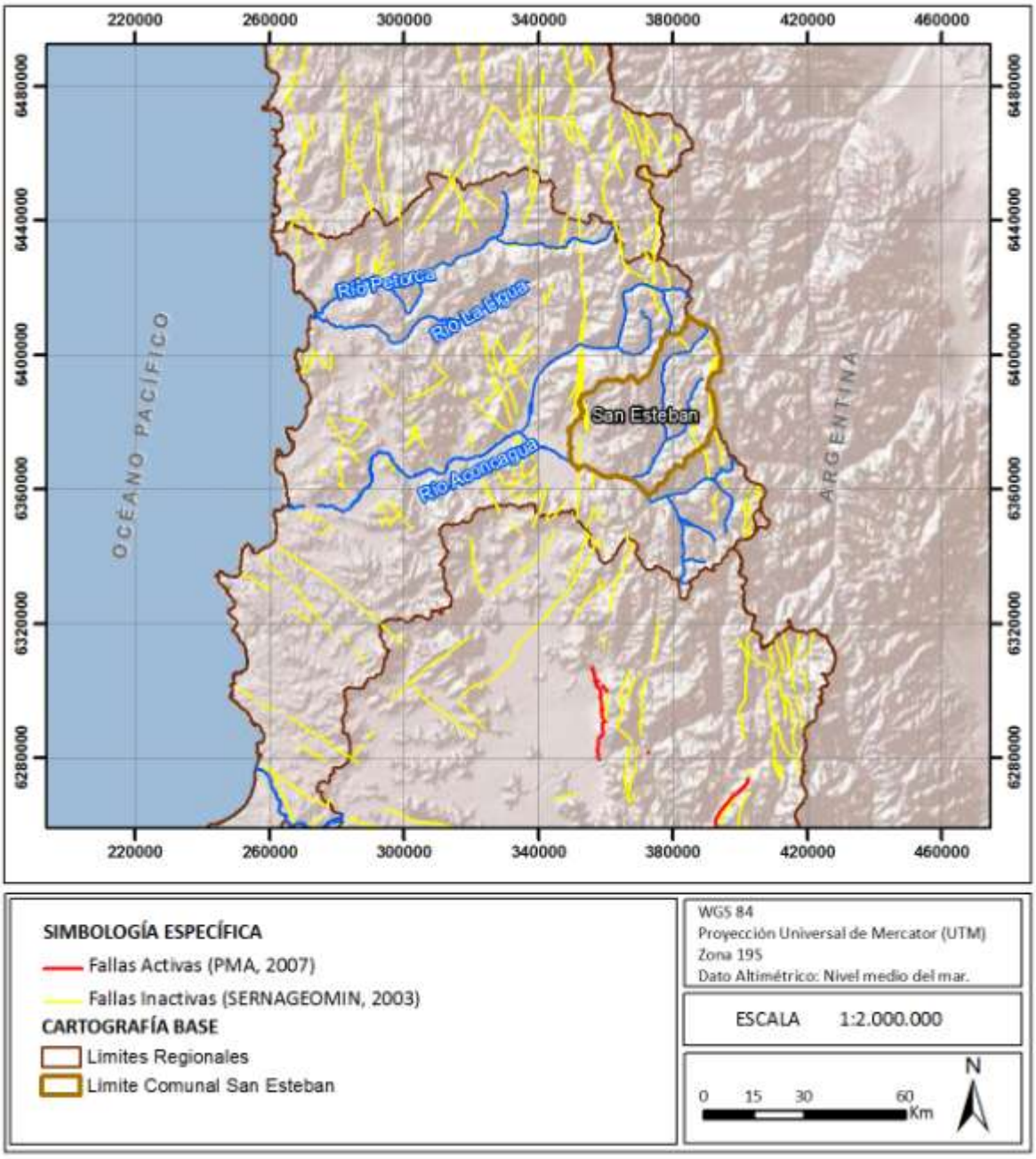
5.3.3.2 Sismos Intraplaca de Profundidad Intermedia

Esta fuente está compuesta por sismos que ocurren dentro de la placa de Nazca. Las profundidades de estos sismos son mayores a 50 km y llegan hasta los 150-200 km. Recientemente, se ha puesto en evidencia que este tipo de eventos poseen notorias diferencias con los de contacto interplaca en las características de la fuente, reflejándose en mayores daños producidos en la zona epicentral y altas aceleraciones máxima reportadas. Los sismos que han causado mayor daño en la zona de estudio corresponden a sismos de estas características, como los sismos de 1965 y 1971. Además el aumento en la concentración de estos sismos registrados al sur de los 31º de latitud sur, abarcando la zona de estudio (cercana a los 32º sur) permite considerar que la zona tiene el potencial de generar grandes terremotos como los ya mencionados.

5.3.3.3 Sismos Corticales

Corresponde a sismos producidos por fallas superficiales, cuyos focos se encuentran a una profundidad menor a 30 km, y están asociados a fallas geológicas activas en superficie. De acuerdo al mapa construido en base a SERNAGEOMIN (2003) y a (PMA-GCA, 2007) (FIGURA Nº 5-6), el que recopila antecedentes generales de fallas, no se observan fallas activas en la región que abarca el área de estudio. Esto se contrapone con los registros instrumentales de sismicidad que se observan en la FIGURA Nº 5-5, los cuales dan cuenta que los sismos corticales aparecen en aumento desde los 32º de latitud hacia el sur. En particular el perfil que abarca la zona de estudio (FIGURA Nº 5-6) muestra una importante sismicidad cortical que está representada en los sismos ocurridos en profundidades menores a 20 km. Estos sismos evidencian que los procesos de formación de Los Andes se encuentran activos y que liberan esfuerzos, en forma de sismos, en fallas corticales activas. Por lo tanto, a pesar que hasta el momento no haya sido reconocida evidencia de fallas activas que tengan deformación superficial, y por ende no haya cartografía de fallas activas, debe considerarse que en la zona existen fallas activas sin expresión superficial.

FIGURA Nº 5-6 Fallas activas cercanas al área de este estudio.

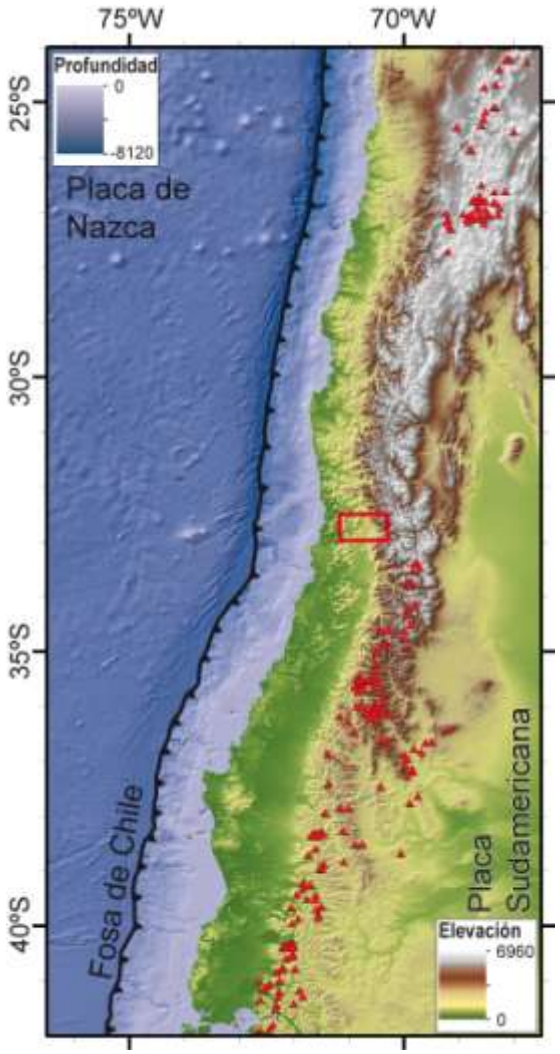


Fuente: Elaboración propia a partir de SERNAGEOMIN (2003) y PMA (2007)

5.4 *Volcanismo*

El área de estudio se encuentra ubicada en el segmento de subducción subhorizontal que se desarrolla entre 27º S y 33º30' S, el que se conoce como zona de subducción plana (flat slab). Cómo se explicó en el capítulo 4.2 "Marco Geodinámico", este sector se caracteriza por la ausencia de la Depresión Central, el desarrollo de valles fluviales transversales y la ausencia de actividad volcánica reciente (FIGURA Nº 4-3). Los volcanes más próximos al área de estudio corresponden al volcán Ojos del Salado, ubicado en las cercanías de Copiapó y perteneciente a la Zona Volcánica Central, y el volcán Tupungatito, asociado a la zona Volcánica Sur y ubicado al norte de Santiago (FIGURA Nº 5-7).

FIGURA Nº 5-7 Ubicación centros volcánicos próximos al área de estudio. Triángulos rojos indican la ubicación de volcanes y rectángulo rojo la ubicación del área de estudio.



Fuente: Elaboración propia a partir de SERNAGEOMIN (2003)

6. DIAGNÓSTICO Y ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD

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

- **Peligros No Zonificables**: a escala comunal (escala de trabajo mayor a 1:50.000): casos en los que no se pueden zonificar a escala urbana o que requerirían estudios de mayor detalle para poder determinar una zonificación de la susceptibilidad.

- **Peligros Zonificables**: a escala comunal (escala de trabajo menor a 1:25.000): casos en los que se puede categorizar la susceptibilidad y por lo tanto determinar una zonificación de la misma (PLANO Nº1 y Nº2 fuera de texto).

6.1 *Peligros No Zonificables*

6.1.1 Peligro Sísmico

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

Tanto para los sismos de profundidad intermedia como los sismos corticales, sus características y recurrencias son poco conocidas. Sin embargo, las evidencias recolectadas apuntan a que la zona puede ser afectada por sismos de ambos tipos. Los sismos de profundidad intermedia se registran en todo el país, la mayor parte corresponde a sismos de magnitud pequeña, para la zona los datos sísmicos señalan la ocurrencia de estos sismos, por lo que no se puede descartar un evento de magnitud importante en el futuro.

6.1.2 Peligro Volcánico

El peligro volcánico no sería una amenaza directa en la zona, dada la ausencia de centros volcánicos al norte de los 33°S y al sur de los 27° S. Por lo anterior, no se considera este peligro para la zonificación, ya que en la cuenca del río Aconcagua no existen volcanes activos y la comuna de San Esteban se encuentra a aprox. 100 km del volcán activo más cercano (volcán Tupungatito). 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.

6.2 *Peligros Zonificables*

6.2.1 Peligro de Inundaciones Terrestres y Flujos de Detritos o Barro

Tomando en cuenta los antecedentes históricos y los rasgos geológicos y geomorfológicos reconocidos en el área de estudio, se determinó la siguiente zonificación de susceptibilidad (FIGURA Nº 6-2):

- **Zonas de Muy Alta Susceptibilidad**: sectores de cauces fluviales naturales de ríos y esteros. Geológicamente corresponden a depósitos fluviales activos del río Aconcagua y de los esteros principales de la comuna (San Francisco y el Cobre).

- **Zonas de Alta Susceptibilidad**: sectores de cauces naturales de quebradas mayores. Geológicamente corresponden a los depósitos fluvio-aluviales activos de quebradas cuya área drenada es mayor a 2 km^2.

- **Zonas de Alta Susceptibilidad (Anegamiento)**: zonas deprimidas, de baja permeabilidad, con niveles freáticos someros y deficiente drenaje del terreno, frecuentemente inundadas debido a lluvias intensas y/o prolongadas.

Para identificar las zonas susceptibles de anegamiento se usaron los siguientes criterios:

- Geomorfología (identificando las zonas deprimidas mediante curvas de nivel).

- Comparación de imágenes satelitales y mediante imágenes aéreas de los vuelos SAF.

- Participación ciudadana. Fue muy importante pues ayudaron a identificar zonas que anualmente sufren anegamiento.

- Visitas a terreno para verificar las zonas identificadas de la unión de los tres criterios anteriores.

- **Zonas de Moderada Susceptibilidad:** sectores de cauces naturales de quebradas menores y sectores de canales artificiales. Corresponden a los depósitos fluvio-aluviales activos de quebradas cuya área drenada es menor a 2 km^2 y a las zonas próximas a canales artificiales, ya que se puede producir *inundación por desbordes de cauces**.

(*) Con respecto a las *inundaciones por desbordes de cauces artificiales* (canales), éstas no corresponden a un peligro geológico en sentido estricto, ya que los canales no son cursos de agua naturales y, por lo tanto, el peligro asociado corresponde más bien a un problema de gestión y diseño. Sin embargo, debido al riesgo potencial asociado a estos procesos, se decidió incluirlos en la zonificación de susceptibilidad de inundaciones. Para ello se realizó una revisión de antecedentes legales y de normativas, tanto de Chile como el resto del mundo.

El Código de Aguas entrega las principales directrices de los usos permitidos y de la normativa vigente para el uso de este recurso natural., señalando en su artículo 5º que "las aguas son bienes nacionales de uso público y se otorga a los particulares el derecho de aprovechamiento de ellas en conformidad a las disposiciones del presente código".

Los códigos más relevantes para la gestión de canales artificiales e inundaciones corresponden a los Artículos 92, 304 y 305, detallados a continuación:

- ***Art. 92.*** *Prohíbese botar a los canales substancias, basuras, desperdicios y otros objetos similares, que alteren la calidad de las aguas.*

- *Será responsabilidad de las Municipalidades respectivas, establecer las sanciones a las infracciones de este artículo y obtener su aplicación.*
- *Además, dentro del territorio urbano de la comuna las Municipalidades deberán concurrir a la limpieza de los canales obstruidos por basuras, desperdicios u otros objetos botados en ellos.*

- ***Art. 304.*** *La Dirección General de Aguas tendrá la vigilancia de las obras de toma en cauces naturales con el objeto de evitar perjuicios en las obras de defensa, inundaciones o el aumento del riesgo de futuras crecidas y podrá ordenar que se modifiquen o destruyan aquellas obras provisionales que no den seguridad ante las creces. Asimismo, podrá ordenar que las bocatomas de los canales permanezcan cerradas ante el peligro de grandes avenidas.*

- *Podrá igualmente adoptar dichas medidas cuando por el manejo de las obras indicadas se ponga en peligro la vida o bienes de terceros.*

- *Con tal objeto podrá ordenar también la construcción de las compuertas de cierre y descarga a que se refiere el artículo 38, si ellas no existieren.*

- ***Art. 305.*** *La Dirección General de Aguas podrá exigir a los propietarios de los canales la construcción de las obras necesarias para proteger caminos, poblaciones u otros terrenos de interés general, de los desbordamientos que sean imputables a defectos de construcción o por una mala operación o conservación del mismo. Con todo, si los desbordamientos se debieran a hechos, u obras ajenas al canal y posteriores a su construcción, las protecciones que sea necesario efectuar no serán de cargo de los propietarios del cauce.*

Por otro lado, la Comisión de Productos Forestales de Idaho (IFPC, por sus siglas en inglés), sugiere el uso de franjas de protección de cauces y canales (ZPC), que varían entre 5 y 75 pies de ancho (1,5 y 23 metros), dependiendo del tamaño del canal[3].

Al respecto, según el "Manual Práctico de Jurisprudencia Administrativa sobre Planes Reguladores comunales, intercomunales y metropolitanos, se indica que los canales de regadío no constituyen zonas de riesgos, si no que a zonas no edificables a que se refiere el artículo 2.1.17. de la OGUC.

[3] http://www.idahoforests.org/streams03.htm accesado el 24 Agosto 2011

De acuerdo a lo anterior, la restricción en las áreas próximas a los canales, considera fajas de protección lateral mínima, definida a nivel de planificación territorial, medida desde el borde superior serán de 5 m en un extremo para materializar un camino de mantención y 1 m en el otro extremo que permita construir los cercos necesarios. Lo anterior se basa en aquella dimensión que permita el tránsito de la maquinaria necesaria para su mantención. Para mayor detalle revisar el Anexo Factibilidad Sanitaria, contenido en este estudio.

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

A. San Esteban: El límite sur del área urbana de San Esteban se encuentra en contacto directo con el cauce activo del río Aconcagua, por lo que es un sector de muy alta susceptibilidad a ser afectado por inundaciones por desborde de cauce. También se da alta susceptibilidad de ser afectado por inundaciones por desborde de cauce el sector NE, cerca del Higueral, debido a la presencia de quebradas, que pueden llegar a drenar un importante caudal hacia la zona urbana.

B. Lo Foncea: En el sector de Foncea no se reconoce a priori peligro de inundaciones que pueda afectar el área urbana propuesta.

C. El Higueral y el Higueral-Chaparrinas: Esta localidad se desarrolla al sur del Estero San Francisco, lo que podría generar que la parte norte de El Higueral se vea afectada por inundaciones por desborde de cauce y/o flujos de barro y detritos provenientes de la alta cordillera.

D. Llanos Norte: Esta localidad se desarrolla al sur del Estero San Francisco, lo que podría generar que la parte norte de El Higueral se vea afectada por inundaciones por desborde de cauce y/o flujos de barro y detritos provenientes de la alta cordillera.

E. Golondrinas: Esta localidad se desarrolla al norte del Estero San Francisco y al Sur del estero del Cobre, lo que podría generar que la parte sur de la localidad se vea afectada por inundaciones por desborde de cauce.

F. Bandurria y El Cobre: La localidad más expuesta a inundaciones corresponde a estas dos localidades, dado que se encuentra en las riberas del Estero El Cobre. A partir del análisis de fotografías aéreas e imágenes satelitales, así como del mapeo geológico, se observa el desarrollo de depósitos fluviales y aluviales activos a lo largo del área urbana propuesta. La presencia de depósitos fluviales y aluviales activos es indicativo de que es un área altamente susceptible a ser afectada por inundaciones por desborde de cauce y/o flujos de barro y detritos provenientes de la zona cordillerana.

Para el caso de los canales artificiales y cauces naturales, en todas las localidades, además de considerar la zonificación previamente señalada, se sugiere considerar una franja de protección de 100 m, en la cual no exista infraestructura potencialmente contaminante, como por ejemplo bencineras, criaderos de animales u otras industrias que almacenen o generen sustancias peligrosas, ya que éstas podrían generar fuentes de contaminación que afecten a los cursos de agua.

6.2.2 Peligro de Remociones en Masa

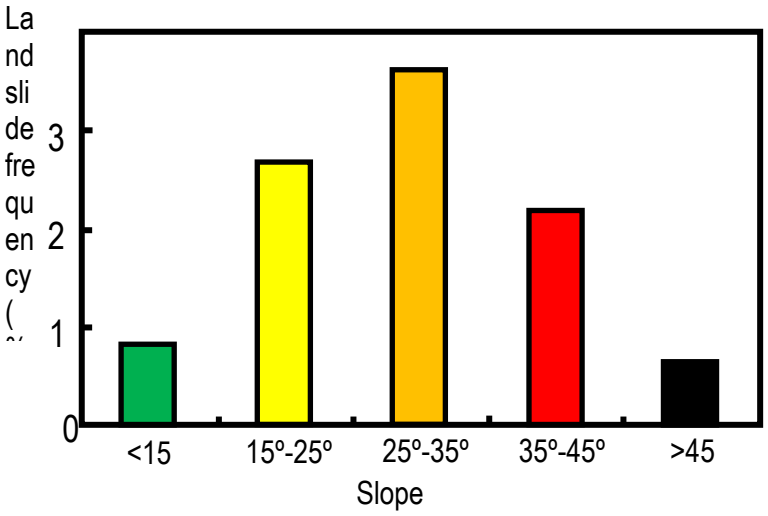
En el área de estudio no existen registros históricos de grandes deslizamientos. Sin embargo, en los sectores Llanos Norte y la zona sur-sur este de San Esteban, existen condiciones geomorfológicas que favorecen la generación de este tipo de fenómenos.

Mediante software, se calcula que el área afectada de las zonas citadas anteriormente es aproximadamente de 1,5 Km^2. Los peligros asociados corresponden a coladas de barro o tierra, flujos de derrubios (entre los 20º y los 45º, según Corominas, et al. (1996)) y avalanchas, si se dieran condiciones meteorológicas extremas. Otros tipos de movimiento que se podrían producir serían deslizamientos rotacionales o traslacionales locales; el problema es que debido al factor escala no se pueden estudiar con detalle en un PRC, ya que se han de analizar a escala 1:100, 1:200 o 1:500. A demás se requiere conocer las características morfológicas y geométricas de la ladera que presenta inestabilidad, las estructuras geológicas y discontinuidades, las condiciones hidrogeológicas y los estados tenso-deformacionales, parámetros que sólo se pueden obtener mediante ensayos geomecánicos “insitu” o en laboratorio.

En el CUADRO Nº 6-1CUADRO Nº 6-1 se detalla la influencia de los diferentes factores que condicionan los movimientos de remociones en masa de los peligros asociados a los sectores Llanos Norte y la zona SSE de San Esteban.

Para diferenciar que pendientes son las más susceptibles, se utilizó la información compilada a partir de diversas fuentes que han generado catastros de deslizamientos en distintos lugares del mundo. Esaki et al. (2005) y Giraud y Shaw (2007), así como varios catálogos de deslizamientos, indican que la mayor frecuencia de deslizamientos se observa sobre pendientes de 25° a 35° de inclinación (FIGURA Nº 6-1).

FIGURA Nº 6-1 Frecuencia de deslizamientos en función de la pendiente del terreno



Fuente: Esaki et al. (2005)

Considerando lo anterior y los antecedentes recopilados, se zonificó la susceptibilidad de generación de deslizamientos y caída de bloques en base a la carta de pendientes generada a partir del DEM. Se determinaron tres categorías (FIGURA Nº 6-2):

- **Muy Alta Susceptibilidad:** Corresponde a sectores de muy alta pendiente (pendientes sobre 35°)

- **Alta Susceptibilidad:** Corresponde a sectores de pendientes entre 25° y 35°

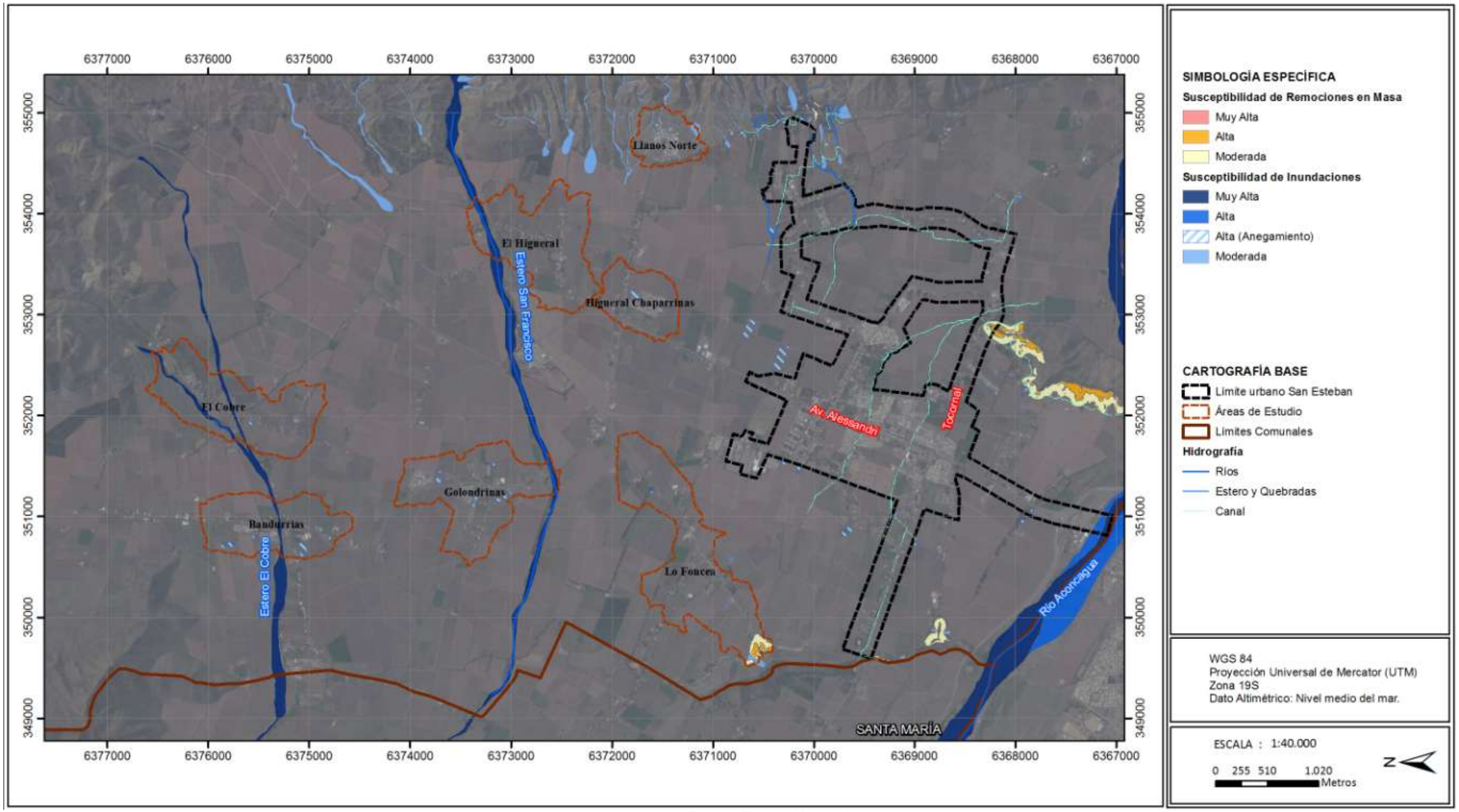
- **Moderada Susceptibilidad**: Corresponde a sectores donde la pendiente se encuentra entre 15° y 25° y las zonas de acumulación de sedimentos provenientes de las laderas con pendientes sobre 15°.

CUADRO Nº 6-1 Influencia de los diferentes factores en las condiciones de los materiales y de las laderas

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

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

FIGURA Nº 6-2 Mapa síntesis de peligros geológicos del área urbana de San Esteban.



Fuente: Elaboración propia.

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

En el CUADRO Nº 7-1 a CUADRO Nº 7-4 se incluye un resumen los peligros geológicos analizados en el área de estudio, con una breve descripción, el detalle del inventario de los eventos recopilados o reconocidos y la metodología para la zonificación de susceptibilidad asociada a cada peligro. En el Plano N°2 fuera de texto se sintetizan las zonas susceptibles a ser afectadas por los peligros zonificables dentro de las localidades estudiadas.

CUADRO Nº 7-1 Síntesis de peligro sísmico para el área de estudio, descripción, inventario, metodología y zonificación

Peligro	SISMICIDAD
Descripción	Este peligro está asociado a la zona de subducción de la Placa de Nazca por debajo de la Sudamericana. Los sismos que se analizaron son los de "costa afuera" asociados a extensión por abombamiento, sismos asociados al contacto interplaca, sismos de intraplaca de profundidad intermedia y sismos superficiales por fallas en la placa Sudamericana. Se analizaron los principales eventos sísmicos y los peligros asociados a ellos
Peligros Asociados	Movimientos de terreno
Factores Desencadenantes	Dinámica de subducción del borde Pacífico del continente Sudamericano
Inventario	El área de estudio presenta antecedentes históricos que indican que ha sido afectada por grandes terremotos intraplaca de profundidad intermedia, tales como los de 1965 y 1971, y terremotos interplaca tipo thrust, por ejemplo, los terremotos 1647, 1730, 1873, 1906 y 1985, tal como se observa en la FIGURA Nº 5-4. También sismos de magnitud cercana a 7, con características de terremoto han afectado a la zona, como por ejemplo el de 1822. Los principales eventos que han afectado al área de estudio se presentan en el CUADRO Nº 5-4
Metodología de Zonificación	La sismicidad no es zonificable a escala local para los alcances de este estudio. En base a antecedentes históricos, mapas de intensidades y comparación con otras zonas, se pueden realizar algunas estimaciones
Zonas Susceptibles	El área de estudio ha sido afectada por sismos importantes, al igual que casi todo Chile. Dado que estos fenómenos son recurrentes y propios de la dinámica de subducción en que se encuentra Chile, no debe descartarse la ocurrencia de grandes sismos por subducción en la planificación a mediano y largo plazo. 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.

Fuente: Elaboración propia

CUADRO Nº 7-2 Síntesis de peligro volcánico para el área de estudio, descripción, inventario, metodología y zonificación

Peligro	VOLCANISMO
Descripción	El peligro volcánico, se asocia a los procesos relacionados con la erupción de un volcán. El área de estudio se encuentra ubicada en el segmento de subducción subhorizontal que se desarrolla entre 27º S y 33º30' S, el que se conoce como zona de subducción plana (flat slab). Cómo se explicó en el Capítulo 4.2 "Marco Geodinámico" este sector se caracteriza por la ausencia de actividad volcánica reciente, sin embargo, los productos asociados a una erupción volcánica pueden tener alcances de centenares de kilómetros
Peligros Asociados	Lluvia de Tefra y Proyectiles Balísticos Flujos Piroclásticos Escurrimiento de Lavas Remociones en Masa y Lahares Sismicidad
Factores Desencadenantes	Dinámica de subducción del borde Pacífico del continente Sudamericano
Inventario	El área de estudio se caracteriza por la ausencia de actividad volcánica reciente. Los volcanes más próximos al área de estudio corresponden al volcán Ojos del Salado, ubicado en las cercanías de Copiapó y perteneciente a la Zona Volcánica Central, y el volcán Tupungatito, asociado a la zona Volcánica Sur y ubicado al norte de Santiago en las nacientes de la cuenca del río Maipo (FIGURA Nº 5-7)**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**.
Metodología de Zonificación	El volcanismo no es zonificable a escala local para los alcances de estudio.
Zonas Susceptibles	El peligro volcánico no sería una amenaza directa en la zona, dada la ausencia de centros volcánicos al norte de los 33°S y al sur de los 27° S. Por lo anterior, no se considera este peligro para la zonificación, ya que en la cuenca del río Aconcagua no existen volcanes activos y la comuna de San Esteban se encuentra a aprox. 100 km del volcán activo más cercano (volcán Tupungatito). Sin embargo, erupciones fuera del área de estudio podrían causar efectos indirectos sobre el área, como contaminación de aguas, problemas de transporte o abastecimiento.

Fuente: Elaboración propia

CUADRO Nº 7-3 Síntesis de peligro de inundaciones para el área de estudio, descripción, inventario, metodología y zonificación

Peligro	INUNDACIONES TERRESTRES Y FLUJOS
Descripción	Este peligro está asociado a eventos pluviométricos extremos, produciendo inundaciones por desborde de cauce o anegamientos. Asociados a estos eventos pueden presentarse flujos de detritos, referidos comúnmente como 'aluviones'
Peligros Asociados	Inundaciones por Desborde de Cauces Inundaciones por Anegamiento Flujos de Detritos
Factores Desencadenantes	Eventos pluviométricos extremos
Inventario	Hasta la fecha no se han encontrado antecedentes que registren inundaciones asociadas al rio Colorado, estero San Francisco y del Cobre que corresponden a los principales cursos de agua de la comuna de San Esteban. Los únicos antecedentes disponibles indican que las principales inundaciones se asocian al río Aconcagua y que han afectado a las comunas aledañas al área de estudio. En el CUADRO Nº 5-1 se muestran las principales crecidas del río Aconcagua en el período 1973-1993, obtenidas desde el informe de MOP-CONAF (1995).
Metodología de Zonificación	Tomando en cuenta los antecedentes históricos y los rasgos geológicos y geomorfológicos reconocidos en el área de estudio, se determinó la siguiente zonificación de susceptibilidad (FIGURA Nº 6-2): *Muy Alta Susceptibilidad: Corresponden a depósitos fluviales activos del río Aconcagua y de los esteros principales de la comuna.* *Alta Susceptibilidad: Corresponden a los depósitos fluvio-aluviales activos de quebradas cuya área drenada es mayor a 2 km^2.* *Moderada Susceptibilidad: Corresponden a los depósitos fluvio-aluviales activos de quebradas cuya área drenada es menor a 2 km^2 y a sectores ubicados a menos de 15 m de canales artificiales.*
Zonas Susceptibles	*Susceptibilidad Muy Alta*: : sectores de cauces fluviales naturales de ríos y esteros. *Susceptibilidad Alta*: sectores de cauces naturales de quebradas mayores (área drenada mayor a 2 km^2). *Susceptibilidad Moerada* sectores de cauces naturales de quebradas menores (área drenada menor a 2 km^2) y sectores aledaños a canales artificiales.

Fuente: Elaboración propia

CUADRO Nº 7-4 Síntesis de peligro de remociones en masa para el área de estudio, descripción, inventario, metodología y zonificación

Peligro	REMOCIONES EN MASA
Descripción	Este peligro está asociado a volúmenes de roca o suelo que son transportados por procesos gravitacionales. Se reconocen dos tipos principales, los deslizamientos y las caídas de rocas. Su alcance es en general limitado, y debe ser tratado como un peligro geológico local
Peligros Asociados	Deslizamientos Desprendimientos o Caídas de Rocas
Factores Desencadenantes	Eventos pluviométrico o sísmicos, intervención antrópica
Inventario	No existen registros de remociones en masa que hayan afectado específicamente a las áreas urbanas de la comuna de San Esteban, sin embargo, hay una serie de registros de remociones en masa que han ocurrido en comunas aledañas a San Esteban, en los años 1980, 1987, 1993 y 1995. Dentro de los daños reportados por remociones en masa en el área cercana a la zona de estudio se incluyen daños a caminos interurbanos, camino internacional, a las vías férreas y pérdidas humanas.
Metodología de Zonificación	Se definieron zonas susceptibles a generar procesos de remoción en masa, principalmente asociadas a las pendientes de las laderas y zonas susceptibles a ser alcanzadas por estos fenómenos (FIGURA Nº 6-2), de acuerdo a los siguientes criterios: - *Susceptibilidad Muy Alta: sectores con pendientes mayores a 35º* - *Susceptibilidad Alta: sectores con pendientes entre 25º y 35º* - *Susceptibilidad Moderada: sectores con pendientes entre 15° y 25° y las zonas de acumulación de sedimentos provenientes de las laderas con pendientes sobre 15°.*
Zonas Susceptibles	Los deslizamientos y caídas de rocas están asociados principalmente a laderas poco estables, especialmente en las zonas de altas pendientes

Fuente: Elaboración propia

8. RECOMENDACIONES

En el CUADRO Nº 8-1 se presenta una síntesis de los peligros reconocidos en el área, los criterios utilizados para la zonificación de susceptibilidad y las recomendaciones para la zonificación urbana de las áreas susceptibles.

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

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

Se recomienda zonificar como no edificables los sectores ubicados sobre zonas de susceptibilidad muy alta y alta de ser afectadas por deslizamientos y caída de bloques.

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

Finalmente, se recomienda realizar capacitaciones a la población con respecto a los peligros geológicos, considerando sus causas y consecuencias. En caso que la autoridad no pueda dar una alerta oportuna, la educación y conocimiento acerca de los diferentes peligros y riesgos geológicos puede salvar vidas debido ya que condiciona a una reacción correcta y autónoma por parte de la población. Como ejemplo podemos 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 cuenta propia después del sismo para protegerse del maremoto.

CUADRO Nº 8-1 Criterios utilizados para definir la zonificación de susceptibilidad y la zonificación urbana recomendada para cada caso

Peligro	Susceptibilidad	Criterios	Zonificación Urbana
Inundación	Muy Alta	Sectores de cauces fluviales naturales del río Aconcagua y los principales esteros de la comuna. Geológicamente corresponden a depósitos fluviales activos de dichos cauces.	Restricción Uso área verde
	Alta	Sectores de cauces naturales de quebradas mayores. Geológicamente corresponden a los depósitos fluvio-aluviales activos de quebradas cuya área drenada es mayor a 2 km^2.	Riesgo (2.1.17). Excluir equipamiento esencial
	Moderada	Sectores de cauces naturales de quebradas menores y sectores aledaños a canales artificlaes. Corresponden a los depósitos fluvio-aluviales activos de quebradas cuya área drenada es menor a 2 km^2 y a los sectores ubicados a menos de 15 m de canales artificiales.	Mitigación con Normas Urbanísticas
Remociones en Masa	Muy Alta	Sectores con pendientes mayores a 35°	Restricción Uso área verde
	Alta	Sectores con pendientes entre 25° y 35°	Riesgo (2.1.17). Excluir todo tipo de equipamiento
	Moderada	Sectores con pendientes entre 15° y 25° y las zonas de acumulación de sedimentos provenientes de laderas con pendientes mayores a 15°.	Riesgo (2.1.17)

Fuente: Elaboración propia

9. REFERENCIAS CITADAS EN EL TEXTO

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.

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.

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..

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.

Campbell, D., 2005. *Termocronología del sector comprendido entre los rios Rocin y Aconcagua: Implicancias en la evolución Meso-Cenozoica de la Zona.,* Santiago de Chile.: Memoria de Título, Universidad de Chile.113p..

Carter, W. & Aguirre, L., 1965. Structural geology of Aconcagua Province and its relationship o 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 tha flat-slab segment southem Central Andes, Chile (33º-36º).. *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.

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.

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.

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., Laín-Huerta, L. & Lloremte-Isidro, M., 2008. *Mapas de Peligrosidad por avenidas e inundaciones: Guía metodológica para su elaboración.* Madrid: nstituto Geológico y Minero de España. Serie Riesgos Geológicos/Geotecnia No. 1, 190 pág.

Esaki, T., Thapa, P., Mitani, Y. & Ikemi, H., 2005. *Landslide and debris flow characteristics and hazard mapping in mountain hillslope terrain using GIS, Central Nepal.* Vancouver, En: Eberhardt, E., Hungr, O., Fell, R., Couture, E. (eds), Proceedings, International Conference on Landslide Risk Managment, p. 657-669..

Fuentes, F., Vergara, M., Aguirre, L. & Féraud, G., 2002. Relaciones de contacto de unidades volcánicas terciarias de los Andes de Chile central (33ºS): una reinterpretación sobre la base de dataciones 40Ar/39Ar.. *Revista Geológica de Chile.,* 29(2), pp. 207-225.

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 Titulo, Universidad de Chile. 476p..

Gana, P. & Wall, R., 1997. Evidencias geocronológicas 40Ar/39Ar y K/Ar de un hiatus Cretácico Superior.Eoceno en Chile Central (33º-33º 30'S).. *Revista Geológica de Chile.,* 24(2), pp. p. 145-163..

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 33º-34º: Nuevos datos en la Coridllera Principal.,* s.l.: VII Congreso Geológico Chileno, Concepción. Vol.2, p. 373-381..

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, Nº único, p. 31-74. .

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., 1987. *Deslizamiento en camino Los Andes-Portillo, sector Guardia Vieja, V Región (Inédito).,* Santiago.: Servicio Nacional de Geología y Minería, 20 p. .

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.

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.

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.

Keeper, D., 1984. Landslides cuased 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.

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.

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.

Martínez-Pardo, R. Gallego, A. & Martínez-Guzmán, R., 1994. Middle Albian marine planktonic microfossils from the Santiago basoin, Central Chile: their depositional and palegeographic 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.

Moore, J. E., 1969. *Water resources investigation program for río Aconcagua valley, Chile,* Santiago: U.S. Geological Survey - IIG.

MOP-CONAF, 1995. *Estudio de Factibilidad, Programa de manejo de Cuencas Hidrográficas, Plan de Ordenamiento y Programa de Manejo Cuenca Río Aconcagua y Estero Marga-Marga.,* s.l.: s.n.

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. & 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.

Navarro, M., 2001. *Estratigrafia 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 Resarch,* 90(B5), pp. 3589-3615.

Ogura, A. & Soares-Macedo, E., 2000. Procesos y Riesgos Geológicos.. En: *II Curso Internacional de Aspectos Geológicos de Protección Ambiental (UNESCO y UNICAMP).* Campinas: s.n., pp. 124-147.

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 33º45' y 33º00'S.,* s.l.: Memoria de Título. Universidad de Chile, 329 p..

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. .

Pierson, T. & Scott, K., 1985. Downstream dilution of Lahar: transition from debris flow to hyperconcentrated streamflow. *Water Research,* 21(10), pp. 1511-1524.

PMA-GCA, 2007. *Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas.* Santiago: Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional, No. 4, 432 p..

Ramos, V. A., 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.

Rivano, G., Sepulveda, H., Boric, P. & Espiñeira, T., 1993. *Geología de las hojas Quillota y Portillo. Carta Geológica de Chile Nº 73.,* Quillota y Portillo: Servicio Nacional de Geología y Minera..

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 loa Andes de Chile Central (32-34ºS).. *Revista Geológica de Chile.,* 17(2), pp. 205-214.

Rivano, S. & Sepulveda, P., 1991. *Hoja Illapel, Region 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. Nº73,* Santiago: Sernageomin.

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 Nº 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 Nº69, escala 1:250.000.,* s.l.: Servicio Nacional de Geología y Minería..

Sancho, C., 1997. Los mapas de riesgos. En: J. Peña, ed. *Cartografía geomorfológica básica y aplicada.* Zaragoza: Geomorfa, pp. 181-200.

Scholz, C., 1990. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting.* Cambridge: Cambridge University Press, 439 pág.

Sepúlveda, S., Murphy, W., Jibson, R. & Petley, D., 2005. Seismically-induced Rock Slope Failures Resulting from Topographic Amplification of Strong Ground Motions: The Case of Pacoima Canyon, California.. *Engineering Geology,* Volumen 80, pp. 336-348.

Sepúlveda, S. y otros, 2010. Landslides induced by the April 2007 Aysén Fjord earthquake, Chilean Patagonia.. *Landslides,* pp. doi: 10.1007/s1034VI-010-0203-2.

SERNAGEOMIN, 2003. *Mapa Geológico de Chile, Versión Digital,* Santiago: Publicación Geológica Digital, Nº4. Santiago, Servicio Nacional de Geología y Minería..

SERNAGEOMIN, 2003. *Mapa Geológico de Chile, Versión Digital,* Santiago: Publicación Digital. Santiago, Servicio Nacional de Geología y Minería..

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 Soth 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.

Tassara, A. G. H.-J. S. S. &. H. R., 2006. Three dimentional density model of the Nazca plate and the Andean continental margin.. *Journal of Geophysical Research, 111(B9), p. B09404..*

Thiele, R., 1980. *Hoja Santiago, región Metropolitana. Carta Geológica Nº29, 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.

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.

Universidad Católica de Chile, 1999. *Estudio de riesgos geofísicos asociados a inundaciones y remoción en masa, macrozonificacion, Valle de Aconcagua. Estudio complementario para la formulación del Plan Regulador intercomunal de Aconcagua, provincias de San Felipe y Los Andes.,* s.l.: Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Arquitectura y Bella Artes..

Urrutia, R. & Lanza, C., 1993. *Catástrofes en Chile 1541 - 1992.* Santiago: La Noria.

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

Varnes, D., 1984. Hazard Zonation: A Review of Principal and Practice. Commission of Landslide of IAEG, UNESCO. *Natural Hazards,* Volumen 3, pp. 1-61.

Wall, R., Selles, D. & Gana, P., 1999. *Área Til Til – Santiago, Región Metropolitana. Mapa geológico Nº11, mapa escala 1:100.000, Santiago.,* s.l.: SERNAGEOMIN. .

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