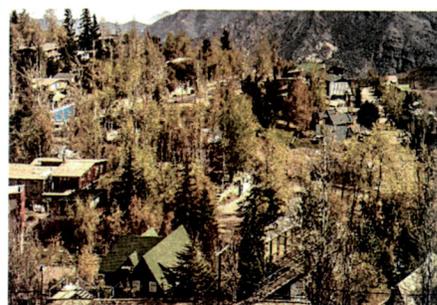


ESTUDIO DE RIESGO Y PROTECCIÓN AMBIENTAL

**MODIFICACIÓN N° 9 AL PLAN REGULADOR COMUNAL DE LO
BARNECHEA, SECTOR CENTRO CORDILLERA**

(FARELLONES, LA PARAVA, EL COLORADO Y VALLE NEVADO)

ABRIL 2018





**ESTUDIO DE RIESGO Y PROTECCIÓN AMBIENTAL
SECTOR CENTRO CORDILLERA, COMUNA DE LO BARNECHEA**

Octubre 2017

Rodrigo Rauld Plott, Geólogo, Doctor en Ciencias mención Geología
Profesional responsable Estudio de Riesgos

Arturo Cañón Mourget, Geógrafo
Profesional Responsable Estudio de Protección Ambiental

ÍNDICE DE CONTENIDOS

PRÓLOGO	i
1. ÁREAS RESTRINGIDAS AL DESARROLLO URBANO: ZONAS NO EDIFICABLES	1-2
1.1 Infraestructura peligrosa en el área en planificación.....	1-2
1.1.1 Revisión bibliográfica.....	1-2
1.1.2 Fotointerpretación.....	1-2
1.1.3 Helipuertos.....	1-3
1.2 Infraestructura peligrosa fuera del área en planificación.....	1-1
1.3 Cuerpos legales que dan origen a la protección.....	1-1
1.3.1 Normas generales.....	1-1
1.3.2 Aplicación en helipuertos en área en planificación.....	1-2
1.4 Normas provenientes del PRMS.....	1-3
2. ÁREAS RESTRINGIDAS AL DESARROLLO URBANO: ÁREAS DE RIESGO	2-4
2.1 Consideraciones generales.....	2-4
2.1.1 Objetivo general del estudio.....	2-4
2.1.2 Alcances y limitaciones del Estudio.....	2-4
2.1.3 Marco jurídico y nomenclatura utilizada en este informe.....	2-4
2.2 Metodología.....	2-1
2.2.1 Definición de áreas de estudio y escala de trabajo.....	2-1
2.2.2 Elaboración de la línea de base geológica y geomorfológica.....	2-3
2.2.3 Elaboración de la línea de base de hidrología y crecidas.....	2-4
2.2.4 Visitas técnicas al área de estudio.....	2-5
2.2.5 Elaboración del catastro de sitios de interés geológico.....	2-8
2.2.6 Zonificación de susceptibilidad de los peligros geológicos.....	2-10
2.3 Línea de base.....	2-1
2.3.1 Marco geodinámico.....	2-1
2.3.2 Marco geomorfológico.....	2-2
2.3.3 Marco geológico.....	2-8
2.3.4 Marco hidrológico.....	2-27
2.4 Catastro de sitios de interés geológico.....	2-1
2.4.1 Sitio de interés geológico N°1: Mirador Farellones.....	2-1
2.4.2 Sitio de interés geológico N°2: Laguna Farellones.....	2-3
2.4.3 Sitio de interés geológico N°3: Depósitos glaciales Quebrada Honda.....	2-4
2.4.4 Sitio de interés geológico N°4: Mirador Valle Nevado.....	2-6
2.5 Catastro de peligros geológicos.....	2-1
2.5.1 Procesos Endógenos.....	2-1
2.5.2 Procesos Exógenos.....	2-14

2.6	Zonificación de susceptibilidad de los peligros geológicos que pueden afectar el área de estudio	2-1
2.6.1	Peligros No Zonificables	2-1
2.6.2	Peligros Zonificables.....	2-18
2.7	Áreas de riesgos considerados en el PRMS.....	2-1
2.8	Zonas o terrenos con riesgos generados por la actividad o intervención humana.....	2-1
3.	ÁREAS DE PROTECCIÓN DE RECURSOS DE VALOR NATURAL	3-1
4.	ÁREAS DE PROTECCIÓN DE RECURSOS DE VALOR PATRIMONIAL CULTURAL.....	4-1
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	5-2
5.1	Sobre zonas no edificables.....	5-2
5.2	Sobre áreas de riesgo.....	5-2
5.2.1	Principios orientadores para la toma de decisiones.....	5-2
5.2.2	Criterios para la zonificación de áreas expuestas a peligros	5-3
5.3	Sobre zonas o terrenos con riesgos generados por la actividad o intervención humana..	5-8
5.4	Sobre áreas de protección de recursos de valor natural.....	5-8
5.5	Sobre áreas de protección de recursos de valor patrimonial cultural.....	5-9
5.6	Recomendaciones fuera del ámbito de la planificación urbana	5-10
5.6.1	Recomendaciones para la protección de los glaciares de roca	5-10
5.6.2	Recomendaciones al sistema de protección civil.....	5-11
6.	Referencias citadas en el texto	6-1

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA Nº 1-1 Ubicación del área de estudio	ii
FIGURA Nº 1-1 Localización de Helipuertos en el área de estudio	1-4
FIGURA Nº 1-2 Helipuerto Valle Nevado SHDO, Valle Nevado	1-4
FIGURA Nº 1-3 Helipuerto Base Central SHLB, El Colorado	1-5
FIGURA Nº 1-4 Helipuerto Base Olimpo SHBO, Valle Nevado	1-5
FIGURA Nº 1-5 Helipuerto La Parva SHLP, La Parva	1-5
FIGURA Nº 1-6 Planta general de superficie limitadora de obstáculos para helipuertos	1-1
FIGURA Nº 1-7 Perfil longitudinal superficie limitadora de obstáculos para helipuertos	1-2
FIGURA Nº 2-1 Diagrama de flujo metodológico	2-1
FIGURA Nº 2-2 Definición de áreas de estudio	2-2
FIGURA Nº 2-3 Recorrido realizado durante las visitas a terreno a las áreas de estudio de detalle entre octubre y noviembre del 2015.....	2-7
FIGURA Nº 2-4 Vista en 3D donde se representa el marco geodinámico	2-2
FIGURA Nº 2-5 Principales unidades morfoestructurales.....	2-4
FIGURA Nº 2-6 Carta de elevaciones del área de análisis de este estudio.....	2-5
FIGURA Nº 2-7 Carta de pendientes del área de análisis de este estudio.....	2-6
FIGURA Nº 2-8 Carta de exposición de laderas del área de análisis de este estudio.....	2-7
FIGURA Nº 2-9 Mapa geológico regional	2-10
FIGURA Nº 2-10 Mapa geológico-geomorfológico local del área de análisis	2-12
FIGURA Nº 2-11 Depósitos fluvio-aluviales en la salida de una obra de arte. Se observan gravas de hasta 25 cm de diámetros, clasto soportadas, con presencia local de matriz de arenas.....	2-13
FIGURA Nº 2-12 Depósitos aluviales en el camino entre Farellones y Valle Nevado. Se observa la coalescencia de abanicos aluviales, y el engrane con depósitos lacustres en las zonas distales de los abanicos.....	2-14
FIGURA Nº 2-13 Depósitos coluviales al costado norte del camino entre Farellones y Valle Nevado. Se observan las morfologías cónicas adosadas a las laderas escarpadas	2-15
FIGURA Nº 2-14 Detalle de depósitos coluviales en calicata. Se observa la estratificación gruesa de los sedimentos, y bloques caídos de algunos metros de diámetro formando parte del depósito....	2-15
FIGURA Nº 2-15 Depósitos lacustres en la Vega Vega de Manantiales. Se observa el afloramiento de agua subterránea y el anegamiento en superficie.....	2-16
FIGURA Nº 2-16 Vista panorámica de la Vega Vega de Manantiales. Se observa limitada lateralmente por dos lóbulos convexos y alargados de depósitos glaciares, y La Parva de fondo.....	2-17
FIGURA Nº 2-17 Depósitos glaciares en ambos costados de la quebrada Honda. Se observa una superficie fuertemente irregular (tipo hummocky), y al menos 45 m de espesor del depósito.....	2-18
FIGURA Nº 2-18 Detalle de los depósitos glaciares en ambos costados de la quebrada Honda. Se observan un depósitos mal seleccionado con bloques de hasta 1,5 m de diámetro.....	2-18
FIGURA Nº 2-19 Ubicación de los glaciares de roca identificados dentro del área de análisis, y en las zonas inmediatamente aledañas. Se reconocen glaciares de roca activos, intactos, relictos e “intactos (?)” (ver pie de figura).....	2-20

FIGURA N° 2-20 Acercamiento al glaciar de roca intacto identificado dentro del área de análisis.	2-21
FIGURA N° 2-21 Vista panorámica del depósito de deslizamientos antiguos. Se observa la gran extensión del depósito (2,7 km) y la topografía superficial tipo hummocky. La flecha negra indica la dirección de movimiento.	2-23
FIGURA N° 2-22 Depresión topográfica entre el depósito y la superficie de ruptura (cicatriz del fondo). Se observan los depósitos lacustres (con un cuerpo de agua) y aluviales en la depresión, así como el relleno coluvial adosado al acantilado.	2-23
FIGURA N° 2-23 Vista del extremo oriental del depósito. Se aprecian los mega bloques (los superiores alcanzan más de 100 m de extensión), inmersos en una matriz de bloques menores.	2-24
FIGURA N° 2-24 Saprolito en el sector de Farellones. Se observa una cobertura de alrededor de 5 m de espesor, de roca fuertemente meteorizada, sobre afloramientos de roca fresca.	2-26
FIGURA N° 2-25 Saprolito en la cuenca de la quebrada Honda. Se observa una cobertura de roca meteorizada en forma de bloques angulosos, en los que intersticialmente hay desarrollo de suelo y raíces.	2-26
FIGURA N° 2-26 Saprolito en el corte de un cerrillo en el camino entre Farellones y Valle Nevado. Se observa una cobertura de roca parcialmente meteorizada, en la que es posible identificar la fábrica y estructura de la roca parental.	2-27
FIGURA N° 2-27 Estaciones hidrometeorológicas cercanas al área de estudio	2-29
FIGURA N° 2-28 Red de drenaje asociada al área de estudio	2-31
FIGURA N° 2-29 Caudales máximos anuales de invierno y verano	2-33
FIGURA N° 2-30 Ajuste de distribuciones de frecuencia de caudales máximos de verano Estero Yerba Loca	2-34
FIGURA N° 2-31 Ajuste de distribución de frecuencia seleccionado con intervalo de confianza de 95%	2-35
FIGURA N° 2-32 Quebradas identificadas	2-36
FIGURA N° 2-33 Quebradas 1 y 2	2-37
FIGURA N° 2-34 Vista de la Quebrada 1 desde punto 1 hacia aguas arriba (arriba) y aguas abajo (abajo)	2-38
FIGURA N° 2-35 Quebrada 2 vista desde el punto 2 hacia aguas arriba (arriba) y hacia aguas abajo (abajo)	2-39
FIGURA N° 2-36 Quebradas 3, 4 y 5	2-40
FIGURA N° 2-37 Quebrada 3 vista desde el punto 3 hacia aguas arriba (arriba) y hacia aguas abajo (abajo)	2-41
FIGURA N° 2-38 Quebrada 4 vista desde punto 4 hacia aguas arriba (arriba) y hacia aguas abajo (abajo)	2-42
FIGURA N° 2-39 Quebrada 5 vista desde punto 5 hacia aguas arriba (arriba) y hacia aguas abajo (abajo)	2-43
FIGURA N° 2-40 Quebrada 6	2-44
FIGURA N° 2-41 Quebrada 6 desde el punto 6 vista hacia aguas arriba (arriba) y hacia aguas abajo (abajo)	2-45
FIGURA N° 2-42 Quebrada 7	2-46

FIGURA N° 2-43 Quebrada 7 desde el punto 7 vista hacia aguas arriba (arriba) y hacia aguas abajo (abajo).....	2-47
FIGURA N° 2-44 Quebradas 8 y 9.....	2-48
FIGURA N° 2-45 Quebrada 8 vista desde el punto 10 hacia aguas arriba (izquierda) y hacia aguas abajo (derecha).....	2-49
FIGURA N° 2-46 Quebrada 8 vista desde el punto 9 hacia aguas arriba (arriba) y hacia aguas abajo (abajo).....	2-50
FIGURA N° 2-47 Quebrada 9 vista desde el punto 11 hacia aguas arriba (arriba) y hacia aguas abajo (abajo).....	2-51
FIGURA N° 2-48 Quebradas 10 y 11	2-52
FIGURA N° 2-49 Vista general de la Quebrada 10 desde el punto 12 (arriba) y vista hacia aguas arriba (abajo).....	2-53
FIGURA N° 2-50 Vista general del humedal en la Quebrada 11 desde el punto 13	2-54
FIGURA N° 2-51 Sitios de interés geológico del área de análisis de este estudio.....	2-2
FIGURA N° 2-52 Sitio de interés geológico N°1: Vista panorámica de Farellones	2-3
FIGURA N° 2-53 Evidencias de distintos tipos de remociones en masa en sitio de interés geológico N°2: Laguna Farellones.....	2-4
FIGURA N° 2-54 Evidencias de variaciones estacionales del nivel de agua de la laguna Farellones (marcadores de niveles del agua en bloques caídos).....	2-4
FIGURA N° 2-55 Vista general del sitio de interés geológico de Depósitos glaciales de la Quebrada Honda.	2-5
FIGURA N° 2-56 Depósitos glaciales de la Quebrada Honda.	2-6
FIGURA N° 2-57 Sitio de interés N°4: Mirador Valle Nevado.....	2-7
FIGURA N° 2-58 Terremotos de subducción históricos (interplaca e intraplaca de profundidad intermedia) con magnitud estimada y calculada mayor a 7.2, y sus segmentos de ruptura.	2-3
FIGURA N° 2-59 Sismos registrados entre 1973 y 2015 por el Catálogo NEIC, eventos de magnitud > 4.....	2-5
FIGURA N° 2-60 Sismos de magnitud >3 registrados entre 1973 y 2010 del Catálogo NEIC (izquierda), junto a perfiles de la sismicidad (derecha).....	2-6
FIGURA N° 2-61 Fallas activas cercanas al área de este estudio.	2-9
FIGURA N° 2-62 Mapa General de la Zona Volcánica Sur. El cuadrado con borde de color rojo muestra la ubicación aproximada del área de estudio.	2-10
FIGURA N° 2-63 Ubicación de los centros volcánicos próximos al área de estudio	2-13
FIGURA N° 2-64 Mapa catastro de peligros geológicos asociados a Procesos Exógenos, en el área de análisis y sus alrededores.....	2-16
FIGURA N° 2-65 Flujo de detritos que cortó el camino interior del parque Cordillera Yerba Loca..	2-17
FIGURA N° 2-66 Ejemplo de bloques caídos en sector aledaño del camino a Valle Nevado.....	2-19
FIGURA N° 2-67 Bloque caído de tamaño mayor a 15 m de diámetro, ubicado junto al camino a Valle Nevado	2-19

FIGURA Nº 2-68 Ejemplo de caída de bloques entre Farellones y Valle Nevado. Bloques de más de 10 m de diámetro afectan el área de estudio de detalle. También se observa una zona de anegamiento, producto de un bajo topográfico del terreno.....	2-20
FIGURA Nº 2-69 Fotografías de zona de caída de bloques entre Farellones y Valle Nevado. Bloques de hasta 5 m diámetro afectan el área de estudio de detalle.....	2-21
FIGURA Nº 2-70 Ejemplo de zonas de caída de detritos en laderas del sector ubicado entre Farellones y Valle Nevado.....	2-22
FIGURA Nº 2-71 Ejemplo de zonas de caída de detritos en laderas del sector ubicado entre Farellones y Valle Nevado.....	2-22
FIGURA Nº 2-72 Ejemplos de pequeñas avalanchas de nieve en el camino a Valle Nevado	2-25
FIGURA Nº 2-73 Ejemplos de deslizamientos al sur de Valle Nevado (números 1 al 5), afectando la zona de estudio de detalle. También se observan cárcavas (número 6).	2-26
FIGURA Nº 2-74 Fotografía con deslizamientos al sur de Valle Nevado dentro la zona de estudio de detalle, afectando a depósitos glaciares.	2-27
FIGURA Nº 2-75 Ejemplos en el camino a Valle Nevado de deslizamientos, cicatrices y depósitos asociados.....	2-28
FIGURA Nº 2-76 Ejemplo de flujo de detritos y/o barro al sur poniente de Valle Nevado (líneas segmentadas), afectando la zona de estudio de detalle. Se interpreta como la zona de derrame actual del abanico aluvial, que ha recolectado los últimos eventos aluvionales.	2-29
FIGURA Nº 2-77 Fotografía de flujo de detritos al sur poniente de Valle Nevado, afectando la zona de estudio de detalle (líneas segmentadas). Se interpreta como la zona de derrame actual del abanico-30	
FIGURA Nº 2-78 Ejemplos de cárcavas y arrastre superficial de material producto de canales de baja jerarquía).	2-31
FIGURA Nº 2-79 Zona de colapso de suelos producidos por socavaciones asociadas a escurrimientos sub-superficiales en sector de Vega de Manantiales.....	2-32
FIGURA Nº 2-80 Ejemplo de socavones generados por escurrimientos sub-superficiales de agua en Vega de Manantiales	2-33
FIGURA Nº 2-81 Ejemplos de vegas y suelos saturados en agua (líneas segmentadas).	2-34
FIGURA Nº 2-82 Fotografías del sector de Vega de Manantiales. A) Afloramientos de agua. B) Afloramientos de agua y suelos finos saturados en agua. C) Vista general	2-35
FIGURA Nº 2-83 Dispersión atmosférica durante verano y otoño. Se representa la acumulación de al menos 1 cm de material piroclástico para un escenario esperable (Índice de explosividad = 2 a 3; Altura de columna = 10 km). La estrella de color rojo indica la ubicación aproximada del área de análisis.2-2	
FIGURA Nº 2-84 Zonificación de susceptibilidad de peligros volcánicos asociados a los volcanes Tupungatito, San José y Maipo.....	2-3
FIGURA Nº 2-85 Respuesta de sitio y susceptibilidad de licuefacción para el área de análisis.	2-17
FIGURA Nº 2-86 Frecuencia de deslizamientos en función de la pendiente del terreno	2-18
FIGURA Nº 2-87 Susceptibilidad de deslizamientos (generación y alcance) para el área de análisis.2-27	
FIGURA Nº 2-88 Susceptibilidad de caída de bloques (generación y alcance) para el área de análisis.	2-32

FIGURA N° 2-89 Susceptibilidad de retroceso de laderas, flujos y anegamientos, para el área de análisis.....	2-34
FIGURA N° 2-90 Zona La Parva, donde se indica las avalanchas de nieve 3 a 11.....	2-43
FIGURA N° 2-91 Zona entre Farellones y Valle Nevado	2-44
FIGURA N° 2-92 Valle Nevado sector entre curva 1 y curva 6.	2-46
FIGURA N° 2-93 Valle Nevado sector de Quebrada Honda	2-47
FIGURA N° 2-94 Susceptibilidad de inundaciones y avalanchas de nieve, para el área de análisis. .2-48	
FIGURA N° 2-95 Quebrada 1	2-6
FIGURA N° 2-96 Quebrada 2	2-7
FIGURA N° 2-97 Quebrada 3	2-8
FIGURA N° 2-98 Quebrada 4	2-9
FIGURA N° 2-99 Quebrada 5	2-10
FIGURA N° 2-100 Quebrada 9	2-15
FIGURA N° 2-101 Ejemplo de proceso de zonificación de susceptibilidad de inundación en quebradas.	2-26
FIGURA N° 8-1 Decreto CMN Santuario de la naturaleza Yerba Loca	3-1
FIGURA N° 8-2 Interpretación cartográfica, Santuario de la naturaleza Yerba Loca	3-2

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO N° 2-1 Cuadro de homologación “áreas de riesgo” según los Apartados 1, 2 y 3 del Artículo 2.1.17 de la OGUC	2-6
CUADRO N° 2-2 Estaciones Meteorológicas.....	2-30
CUADRO N° 2-3 Estaciones Fluviométricas.....	2-30
CUADRO N° 2-4 Característica de principales cuencas aportantes	2-32
CUADRO N° 2-5 Información disponible de caudales instantáneos en estaciones fluviométricas .	2-32
CUADRO N° 2-6 Test de ajuste de frecuencia	2-34
CUADRO N° 2-7 Caudales de verano por período de retorno	2-35
CUADRO N° 2-8 Caudal de diseño.....	2-36
CUADRO N° 2-9 Datos de terremotos históricos de subducción (interplaca e intraplaca de profundidad intermedia) con magnitud superior a 7.5, cuyas zonas de ruptura coinciden aproximadamente con la latitud del área de estudio.....	2-4
CUADRO N° 2-10 Datos de principales terremotos recientes cuyas áreas de ruptura no coinciden con el área de estudio, pero están asociados a altas intensidades en la Región Metropolitana	2-4
CUADRO N° 2-11 Principales volcanes en sectores cercanos al área de estudio.....	2-12
CUADRO N° 2-12 Eventos catastrados a partir de bibliografía, prensa y por entrevista con el encargado de emergencia.	2-15
CUADRO N° 2-13 Alcances de deslizamientos en los que fue posible identificar las cicatrices y depósitos asociados	2-24
CUADRO N° 2-14 Respuesta de sitio según cada unidad geológica.....	2-16

CUADRO N° 2-15 Clases utilizadas para cada factor condicionante.....	2-20
CUADRO N° 2-16 Susceptibilidad de generación de deslizamientos según rangos de ISD.....	2-21
CUADRO N° 2-17 Cálculo de pesos y contrastes para cada clase de los factores condicionantes considerados para aplicar el Método Peso de la Evidencia.....	2-22
CUADRO N° 2-18 Valores de alcance utilizados para el modelo en GIS, y número de puntos de cada set de puntos.....	2-24
CUADRO N° 2-19 Susceptibilidad de alcance de deslizamientos según la densidad de puntos	2-25
CUADRO N° 2-20 Unidades Morfológicas principales en base a los ángulos de pendiente.....	2-29
CUADRO N° 2-21 Matriz de susceptibilidad de generación de caída de bloques.....	2-29
CUADRO N° 2-22 Valores de alcance utilizados para el modelo en GIS, y número de puntos de cada set de puntos.....	2-30
CUADRO N° 2-23 Susceptibilidad de alcance de caída de bloques según la densidad de puntos	2-30
CUADRO N° 2-24 Rangos de Ponderador y Susceptibilidad de Sendas de Avalanchas	2-41
CUADRO N° 2-25 Valores para el cálculo del coeficiente de manning mediante la Ecuación 2.....	2-4
CUADRO N° 2-26 Valores del coeficiente n de manning en cauces naturales. Manual de carreteras, Volumen 3, Tabla 3.707.104.A.....	2-5
CUADRO N° 2-27 Valores de coeficiente de Manning utilizados para la modelación en HEC-RAS... 2-17	
CUADRO N° 2-28 Datos Sistema 1	2-19
CUADRO N° 2-29 Datos Sistema 2	2-20
CUADRO N° 2-30 Datos Sistema 3	2-21
CUADRO N° 2-31 Datos Sistema 4	2-22
CUADRO N° 2-32 Datos Sistema 5	2-23
CUADRO N° 2-33 Datos Sistema 6	2-24
CUADRO N° 2-34 Datos Sistema 7	2-25
CUADRO N° 2-35 Datos Sistema 8	2-26
CUADRO N° 5-1 Recomendación de criterios para la zonificación en áreas de riesgo	5-5
CUADRO N° 5-2: Agrupamiento de susceptibilidades según OGUC.....	5-7
CUADRO N° 5-3 Tipos de intervenciones sobre glaciares de roca y sus posibles consecuencias. 5-10	

ÍNDICE DE PLANOS FUERA DE TEXTO

PLANO N° 1A Avalanchas	1:10.000
PLANO N° 1B Avalanchas Valle Nevado	1:2.000
PLANO N° 1C Avalanchas Valle Nevado Oriente	1:2.000
PLANO N° 1D Avalanchas Valle Nevado Poniente	1:2.000
PLANO N° 1E Avalanchas Farellones	1:2.000
PLANO N° 1F Avalanchas Colorado La Parva	1:2.000
PLANO N° 1G Avalanchas Vega de Manantiales	1:2.000
PLANO N° 2A Caída de Bloques – Retroceso – Anegamiento - Inundación	1:10.000
PLANO N° 2B Caída de Bloques – Retroceso – Anegamiento - Inundación Valle Nevado	1:2.000
PLANO N° 2C Caída de Bloques – Retroceso – Anegamiento - Inundación Valle Nevado Oriente	1:2.000
PLANO N° 2D Caída de Bloques – Retroceso – Anegamiento - Inundación Valle Nevado Poniente	1:2.000
PLANO N° 2E Caída de Bloques – Retroceso – Anegamiento - Inundación Farellones	1:2.000
PLANO N° 2F Caída de Bloques – Retroceso – Anegamiento - Inundación Colorado La Parva	1:2.000
PLANO N° 2G Caída de Bloques – Retroceso – Anegamiento - Inundación Vega de Manantiales	1:2.000
PLANO N° 3A Deslizamientos – Flujos de Detritos	1:10.000
PLANO N° 3B Deslizamientos – Flujos de Detritos Valle Nevado	1:2.000
PLANO N° 3C Deslizamientos – Flujos de Detritos Valle Nevado Oriente	1:2.000
PLANO N° 3D Deslizamientos – Flujos de Detritos Valle Nevado Poniente	1:2.000
PLANO N° 3E Deslizamientos – Flujos de Detritos Farellones	1:2.000
PLANO N° 3F Deslizamientos – Flujos de Detritos Colorado La Parva	1:2.000
PLANO N° 3G Deslizamientos – Flujos de Detritos Vega de Manantiales	1:2.000
PLANO N° 4 Infraestructura	1:10.000
PLANO N° 5 Licuefacción	1:10.000
PLANO N° 6 Áreas de Riesgo	1:10.000
PLANO N°7A y N°7B Áreas de Riesgo y Zonificación PRC	1:5000
PLANO N°8A y N°8B Áreas Restringidas al Desarrollo Urbano	1:5000

PRÓLOGO

La Ilustre Municipalidad de Lo Barnechea en el marco de la Modificación del Plan Regulador Comunal para el área denominada Sector Centro Cordillera, Comuna de Lo Barnechea presenta, según el requerimiento del artículo 2.1.10 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, este Estudio de Riesgos y Protección Ambiental como insumo para la adecuada planificación del territorio materia de este asunto.

Este Estudio está orientado a dar cabal cumplimiento a las disposiciones contempladas en la Ley General de Urbanismo y Construcciones y en especial en los artículos 2.1.17 y 2.1.18 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), por tanto solamente trata aquellos temas que son pertinentes a un Plan Regulador Comunal, dejando fuera de su alcance otros fenómenos o elementos presentes en el área que no son materia de regulación por estos cuerpos legales.

El estudio se divide en 4 capítulos principales más el capítulo sobre Referencias y Anexos

En los dos primeros capítulos se tratan las Áreas Restringidas al Desarrollo Urbano: en el Capítulo 1 las Zonas No Edificables y en el Capítulo 2 las Áreas de Riesgos según se las define en el artículo 2.1.17 de la OGUC.

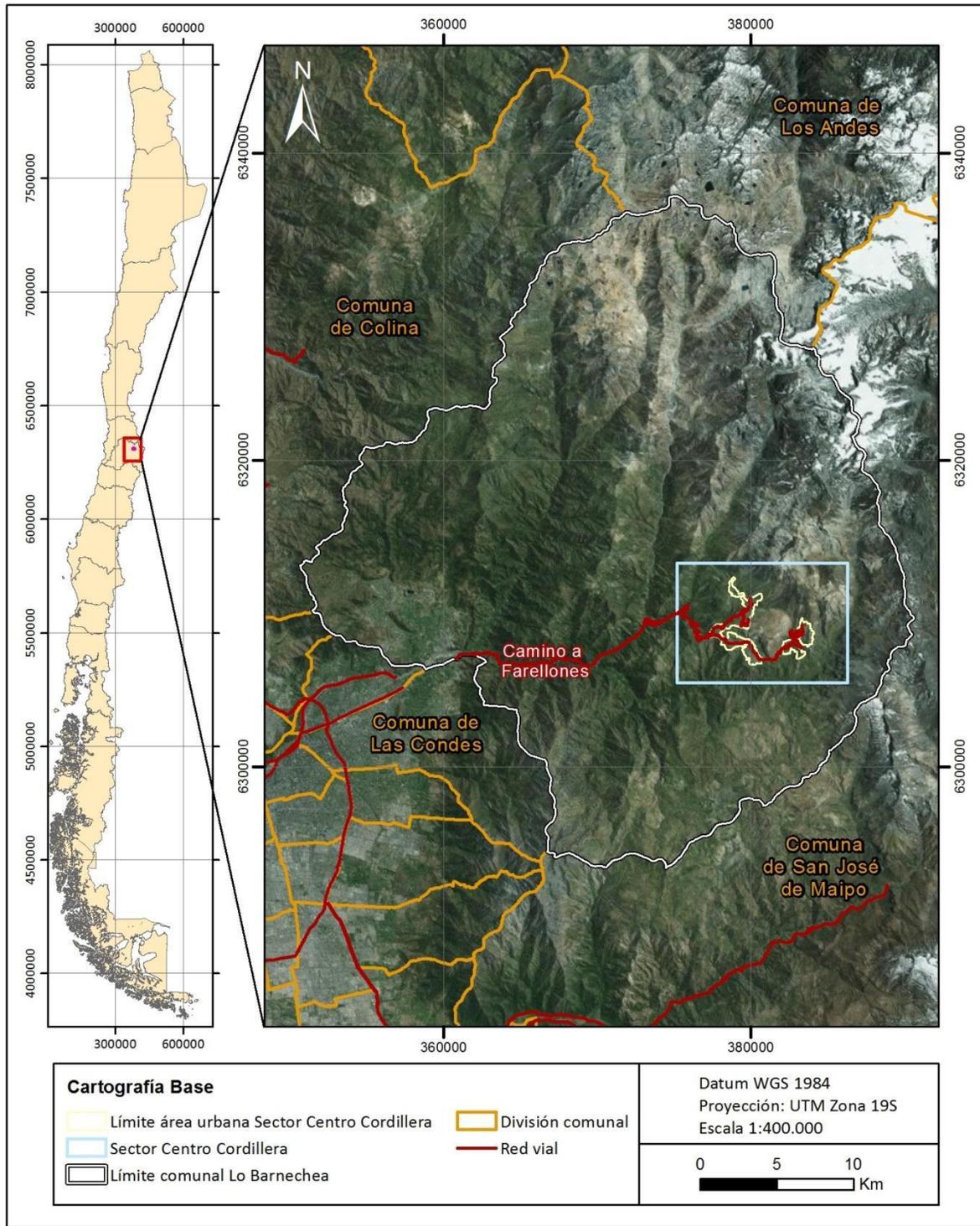
Luego en los dos capítulos siguientes se tratan las Áreas de Protección: en el Capítulo 3 las Áreas De Protección de Recursos de Valor Natural y en el Capítulo 4 las Áreas de Protección de Recursos de Valor Patrimonial Cultural, tal como se establecen en el artículo 2.1.18 de la OGUC.

El área de estudio corresponde a las áreas urbanas del Centro Cordillera de la comuna de Lo Barnechea, que incluye Farellones, La Parva, El Colorado y Valle Nevado, que ocupan en conjunto una superficie de aproximadamente 700 hectáreas localizadas en la zona oriente de la comuna

Geográficamente, el área de estudio se ubica en la Cordillera Principal, entre los 33°19'15" y los 33°22'22" Latitud Sur y los 70°14'44" y los 70°19'08" de Longitud Oeste en la Región Metropolitana.

La comuna de Lo Barnechea limita con las comunas de Colina, Huechuraba, Vitacura, Las Condes, San José de Maipo y Los Andes

FIGURA N° 1-1 Ubicación del área de estudio



Fuente: Elaboración propia.

1. ÁREAS RESTRINGIDAS AL DESARROLLO URBANO: ZONAS NO EDIFICABLES

El artículo 2.1.17 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones referido a Áreas Restringidas al Desarrollo Urbano, en su inciso tercero define las zonas no edificables de la siguiente manera:

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

Luego, en su inciso sexto señala: *Las “zonas no edificables” corresponderán a aquellas franjas o radios de protección de obras de infraestructura peligrosa, tales como aeropuertos, helipuertos, torres de alta tensión, embalses, acueductos, oleoductos, gaseoductos, u otras similares, establecidas por el ordenamiento jurídico vigente.*

En este marco, este estudio i) identifica las obras de infraestructura peligrosa situadas al interior del área en planificación ii) identifica las obras de infraestructura peligrosa ubicadas fuera del área en planificación pero que su franja o radio de protección afecte el área en planificación, iii) identifica los cuerpos legales que dan origen a la protección y iv) señala gráficamente en los planos las franjas o radios de protección aplicables.

Cabe notar que además debe señalarse además aquellas zonas no edificables establecidas en un IPT de rango superior (Plan Regulador Intercomunal o Plan Regulador Metropolitano, según sea el caso).

1.1 **Infraestructura peligrosa en el área en planificación.**

1.1.1 Revisión bibliográfica

Fueron revisados los proyectos ingresados al Sistema de Evaluación Ambiental (SEIA), en donde se identifica la localización y descripción de los proyectos dentro del área de estudio.

Se revisaron documentos oficiales en diversas reparticiones responsables de la infraestructura peligrosa.

1.1.2 Fotointerpretación

Por medio de fotointerpretación sobre las imágenes aéreas y satelitales disponibles se identificó aquella infraestructura que amerita ser estudiada para este efecto.

1.1.2.1 Terreno

Se realizó un recorrido de terreno para corroborar y levantar información, el cual se detalla a continuación:

Equipo Participante

- *Arturo Carrión Mourguet, Geógrafo*
- *Catherine Barra Campaña, Cartógrafa*

- Maximiliano Salazar Palomo, Ingeniero Civil en Geografía

Preparación del terreno

- Revisión bibliográfica de documentos DGAC, SISS, SEIA, CONAF, entre otros.
- Entrevista telefónica Secretario de la Corporación de Adelanto de Farellones, Sr. José Ignacio Figueroa Elgueta, en donde se consultó sobre los principales problemas que presenta el área de estudio.
- Fotointerpretación de la infraestructura peligrosa
- Sistematización de los riesgos a revisar en terreno

Actividades de terreno

- Recorrido por los cuatro centros de ski y sus alrededores en donde se realizó una inspección visual de la infraestructura peligrosa previamente catastrados en el siguiente orden:
 - Farellones
 - La Parva
 - El Colorado
 - Valle Nevado

Sobre la base del reconocimiento de terreno, análisis cartográfico y de imágenes aéreas y satelitales, todo complementado con entrevistas a conocedores del lugar, en el área en planificación se identificaron solamente 4 helipuertos¹ que dan origen a normas de protección de infraestructura peligrosa.

1.1.3 Helipuertos

Los cuatro helipuertos existentes en el área de estudio están distribuidos en tres de los cuatro centros turísticos y son los siguientes:

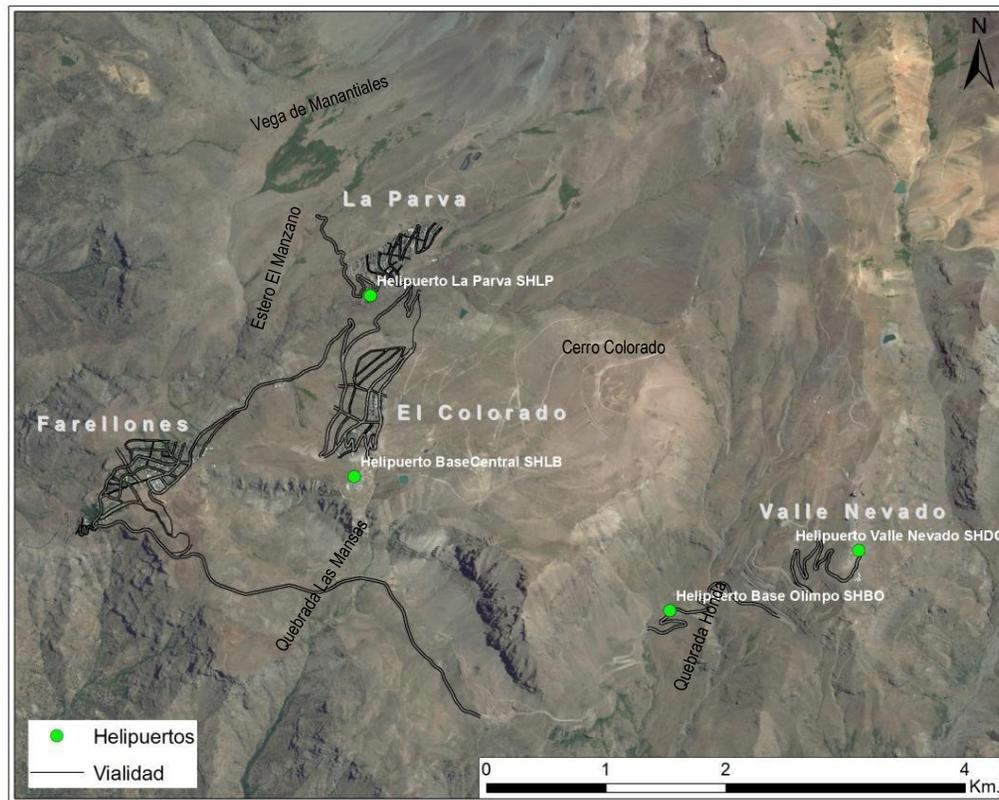
CUADRO N° 1-1 Helipuertos en el área de estudio

Lugar	Centro de Ski más cercano	Código DGAC	Altitud (m.s.n.m)	Latitud (grados decimales)	Longitud (grados decimales)
Valle Nevado	Valle Nevado	SHDO	3.004	-70,249	-33,358
Base Central	El Colorado	SHLB	2.759	-70,293	-33,353
Base Olimpo	Valle Nevado	SHBO	2.592	-70,266	-33,362
La Parva	La Parva	SHLP	2.666	-70,292	-33,338

Fuente: DGAC, 2015

¹ La Dirección General de Aeronáutica Civil un Helipuerto se define como un "Aeródromo o área definida sobre una estructura artificial destinada a ser utilizada, total o parcialmente, para la llegada, la salida o el movimiento en superficie de los helicópteros" DGAC, DAR 04, 2004.

FIGURA N° 1-1 Localización de Helipuertos en el área de estudio



Fuente: Elaboración estudio. DGACA

En las figuras siguientes se muestran en detalles su localización en base a imagen aérea y fotografía en terreno.

FIGURA N° 1-2 Helipuerto Valle Nevado SHDO, Valle Nevado



Fuente: Elaboración estudio

FIGURA N° 1-3 Helipuerto Base Central SHLB, El Colorado



Fuente: Elaboración estudio

FIGURA N° 1-4 Helipuerto Base Olimpo SHBO, Valle Nevado



Fuente: Elaboración estudio

FIGURA N° 1-5 Helipuerto La Parva SHLP, La Parva



Fuente: Elaboración estudio

1.2 Infraestructura peligrosa fuera del área en planificación

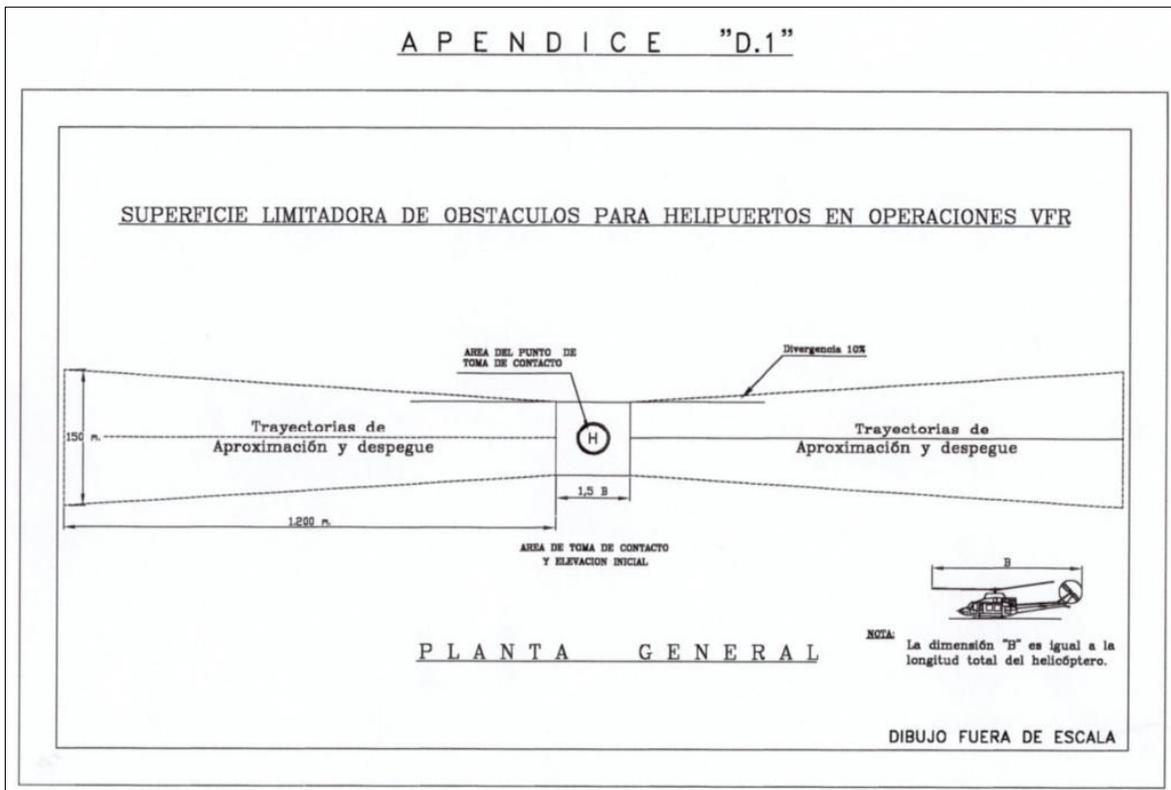
No existe infraestructura peligrosa fuera del área en planificación cuya faja o radio de protección la afecte

1.3 Cuerpos legales que dan origen a la protección

1.3.1 Normas generales

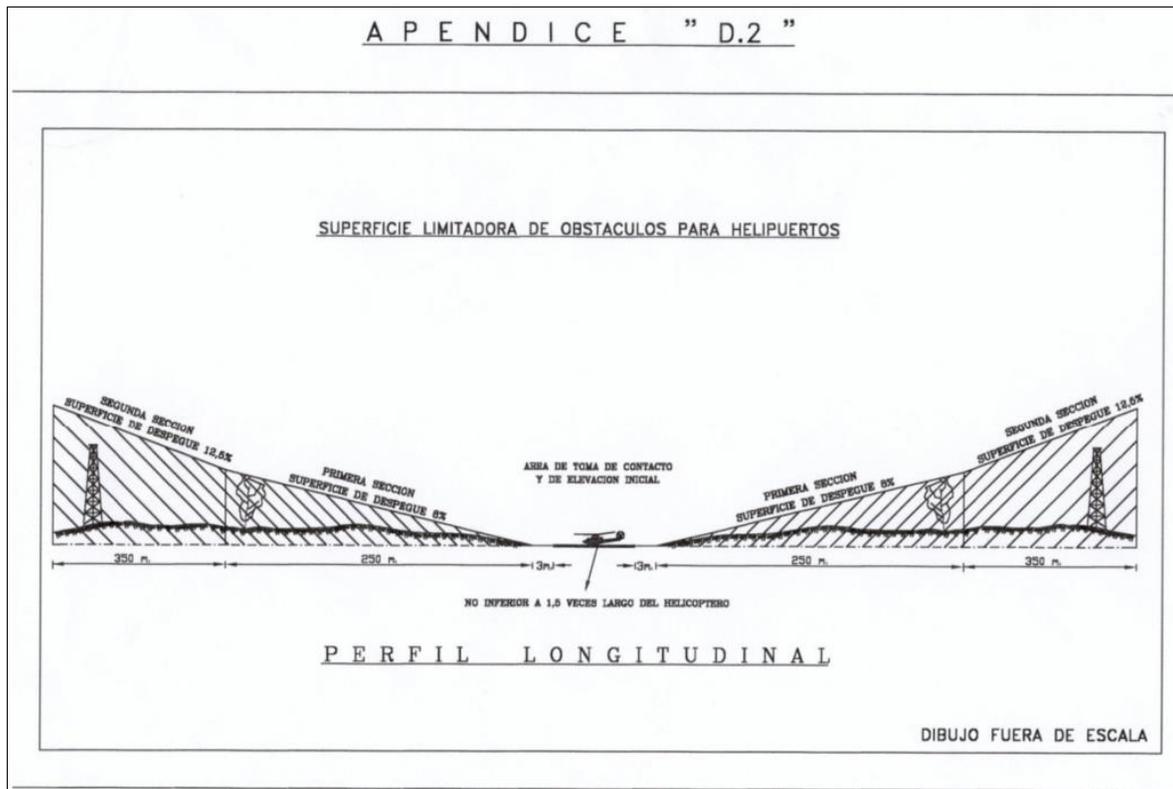
La norma aplicable para definir las superficies limitadoras de obstáculos que restringen la altura de las edificaciones y otras instalaciones en el entorno de los helipuertos están contenidas en la circular de la Dirección General de Aeronáutica Civil denominada DAC-14-00-004D y cuya geometría general se muestra en las siguientes figuras.

FIGURA N° 1-6 Planta general de superficie limitadora de obstáculos para helipuertos



Fuente; DAC-14-00-004D

FIGURA N° 1-7 Perfil longitudinal superficie limitadora de obstáculos para helipuertos



Fuente; DAC-14-00-004D

1.3.2 Aplicación en helipuertos en área en planificación.

Para cada uno de los 4 helipuertos se traza en planta un polígono de operación hacia el lado libre de obstáculos, ya que por la pronunciada pendiente de los terrenos donde se ubican no es posible definir polígonos hacia ambos lados.

1.4 Normas provenientes del PRMS

La Ordenanza del Plan Regulador Metropolitano de Santiago establece en su Capítulo 8.2 Áreas de alto riesgo para los asentamientos humanos, las cuales *“corresponden a los territorios, en los cuales el emplazamiento de asentamientos humanos se debe restringir en forma parcial o total, en consideración a las características que presentan”*

Esta Ordenanza las define en su artículo 8.2.2 Áreas de Riesgo por Actividades Peligrosas de la siguiente manera: *“Las áreas de riesgo por actividades peligrosas son aquellas que ya presentan instalaciones altamente peligrosas que, por sus características y para los efectos de la aplicación de la planificación territorial, se considerarán siempre de carácter metropolitano por el impacto que provocan en los sistemas funcionales urbanos y las áreas que las rodean. Estas áreas incluyen las instalaciones y territorio adyacentes que se determinarán a través de estudios específicos en cada caso, en los cuales sea necesario restringir y controlar el proceso de desarrollo urbano para evitar riesgos a la población y cautelar su funcionamiento. Dentro de esta categoría se incluyen, entre otras, las plantas de almacenamiento, distribución y/o procesamiento de combustibles, las plantas de producción y/o almacenamiento de gas y/o derivados del petróleo, las fábricas y/o almacenamiento de productos químicos explosivos, polvóricos y/o inflamables, las fábricas y/o almacenamiento de explosivos, municiones y otras.”*

En esta Ordenanza, el PRMS no se hace ninguna mención a actividades peligrosas en el área en planificación en la comuna de Lo Barnechea que den origen a Zonas No Edificables.

2. ÁREAS RESTRINGIDAS AL DESARROLLO URBANO: ÁREAS DE RIESGO

2.1 Consideraciones generales

2.1.1 Objetivo general del estudio

El objetivo principal de este trabajo es reconocer y delimitar las áreas restringidas al desarrollo urbano denominadas Áreas de Riesgos de acuerdo a las disposiciones contempladas en el artículo 2.1.17 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC).

Si bien el área en planificación sobre la cual es preciso determinar esas Áreas de Riesgo es el límite urbano del Sector Centro Cordillera de la comuna de Lo Barnechea, por razones metodológicas, el área de estudio analiza un sector más amplio de manera de identificar también aquellos peligros que tienen origen fuera del área en planificación pero que pueden afectarla.

2.1.2 Alcances y limitaciones del Estudio

Para este trabajo se realizó una compilación de referencias bibliográficas, antecedentes históricos, revisión de imágenes satelitales y la evaluación de los distintos factores condicionantes para zonificar los peligros geológicos que podrían afectar a las áreas de estudio de detalle del Sector Centro Cordillera de la comuna de Lo Barnechea.

La zonificación se realizó de acuerdo a las definiciones presentadas en el ANEXO A, a una escala 1:2.000 (áreas de estudio de detalle) y a 1:10.000 (área de análisis), considerando que la gran mayoría de la información geológica está a una escala menor a 1:100.000. Se debe destacar que los resultados de este trabajo sólo son utilizables en la escala de análisis en la cual fueron creados. Cualquier intento por utilizar estos mapas sobre cartografía de mayor detalle puede distorsionar severamente sus resultados, pudiendo afectar gravemente las decisiones que se tomen en materias de planificación territorial.

Este trabajo ha tenido siempre presente que la planificación territorial debe basar sus decisiones en criterios conservadores respecto al resguardo de la vida y también de los bienes de las personas, por lo que se considera metodológicamente adecuado determinar los factores condicionantes y sus correspondientes mapas de susceptibilidad (ver las definiciones presentadas en el ANEXO A.), sin necesidad de recurrir a análisis de mayor detalle (y mayor costo) o a satisfacer la curiosidad de otros enfoques que no son necesariamente funcionales a la planificación territorial.

Como resultado, este estudio entrega mapas de factores condicionantes - principalmente morfológicos y geológicos - mapas de inventarios de los diferentes peligros geológicos identificados, mapas de susceptibilidad y mapas de zonificación de resultados aplicados al uso de la OGUC.

2.1.3 Marco jurídico y nomenclatura utilizada en este informe

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

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

Por “áreas de riesgo”, se entenderán aquellos territorios en los cuales, previo estudio fundado, se restrinja determinado tipo de construcciones por razones de seguridad contra desastres naturales u otros semejantes, que requieran para su utilización la incorporación de obras de ingeniería o de otra índole, suficientes para subsanar o mitigar tales efectos.

En el marco de este informe, “áreas de riesgo” son definidas como las zonas susceptibles a ser afectadas por un peligro geológico, dado que la zonificación se realizó a partir de mapas de susceptibilidad y de factores condicionantes (ver las definiciones presentadas en el ANEXO SS: “Definiciones”).

En el CUADRO N°2-1 se presentan los peligros naturales identificados por el artículo 2.1.17 de la OGUC, y la homologación con la nomenclatura internacional utilizada por este informe. A continuación se desglosan los anexos donde se definen estos peligros geológicos y los criterios de zonificación utilizados.

- Apartado 1 del artículo 2.1.17 de la OGUC: Zonas inundables o potencialmente inundables, debido entre otras causas a maremotos o tsunamis, a la proximidad de lagos, ríos, esteros, quebradas, cursos de agua no canalizados, napas freáticas o pantanos.
De acuerdo a las definiciones utilizadas en este informe, el Apartado 1 del artículo 2.1.17 de la OGUC corresponde a los peligros geológicos de inundación, ya sea continental o costera. Este tópico que se explica conceptualmente en el ANEXO TT.2.1.
- Apartado 2 del artículo 2.1.17 de la OGUC: Zonas propensas a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas.
El Apartado 2 del artículo 2.1.17 de la OGUC corresponde a los peligros geológicos de remociones en masa (caída de bloques, deslizamientos y flujos de barro y detritos) y los procesos litorales de erosión acentuada. Estos se explican conceptualmente en el ANEXO TT.2.2.
- Apartado 3 del artículo 2.1.17 de la OGUC: Zonas con riesgo de ser afectadas por actividad volcánica, ríos de lava o fallas geológicas.
Dentro de este apartado definido por la OGUC se analizan conceptualmente los procesos endógenos internos de la tierra, descritos en el ANEXO TT.1.
- Apartado 4 del artículo 2.1.17 de la OGUC: Zonas o terrenos con riesgos generados por la actividad o intervención humana.

CUADRO N° 2-1 Cuadro de homologación “áreas de riesgo” según los Apartados 1, 2 y 3 del Artículo 2.1.17 de la OGUC

“Áreas de riesgo” según artículo 2.1.17 de la OGUC	Peligros Geológicos estudiados en este informe	
1. Zonas inundables o potencialmente inundables, debido entre otras causas a maremotos o tsunamis, a la proximidad de lagos, ríos, esteros, quebradas, cursos de agua no canalizados, napas freáticas o pantanos	Inundación por desborde de cauce	
	Anegamiento	
2. Zonas propensas a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas	Remociones en masa	Flujo de barro y detritos.
		Caída de bloques
		Deslizamientos
		Retroceso de ladera
		Avalanchas de nieve
3. Zonas con peligro de ser afectadas por actividad volcánica, ríos de lava o fallas geológicas	Sismicidad	
	Volcanismo	Flujos de piroclastos
		Caída de piroclastos
		Coladas de lava

Fuente: Elaboración propia en base al artículo 2.1.17 de la OGUC.

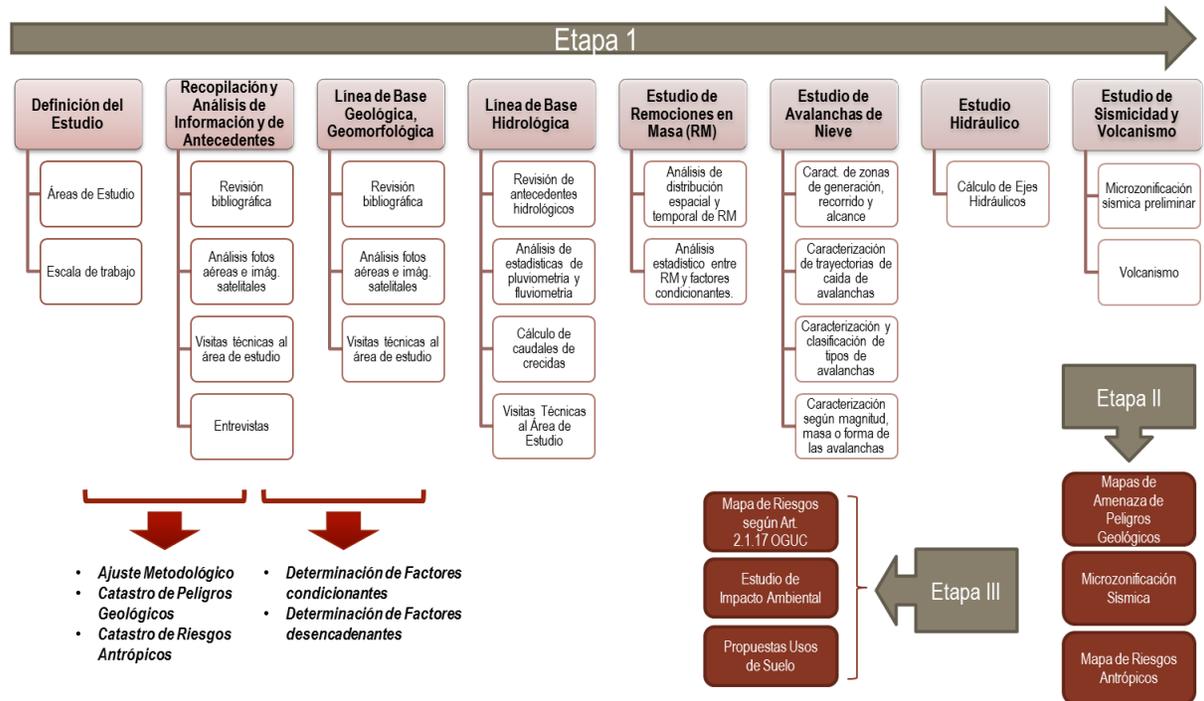
2.2 Metodología

Con el fin de cumplir con los objetivos de esta etapa, se realizaron las siguientes tareas, las que se encuentran resumidas en la FIGURA N° 2-1:

1. Definición de áreas de estudio y escala de trabajo
2. Elaboración de la línea de base geológica y geomorfológica
3. Elaboración de la línea de base hidrológica
4. Visitas técnicas al área de estudio
5. Elaboración del catastro de peligros geológicos
6. Elaboración del catastro de riesgos antrópicos
7. Caracterización y análisis de peligros reconocidos

A continuación, se detalla la metodología específica utilizada en cada una de las tareas nombradas previamente.

FIGURA N° 2-1 Diagrama de flujo metodológico



Fuente: Elaboración propia

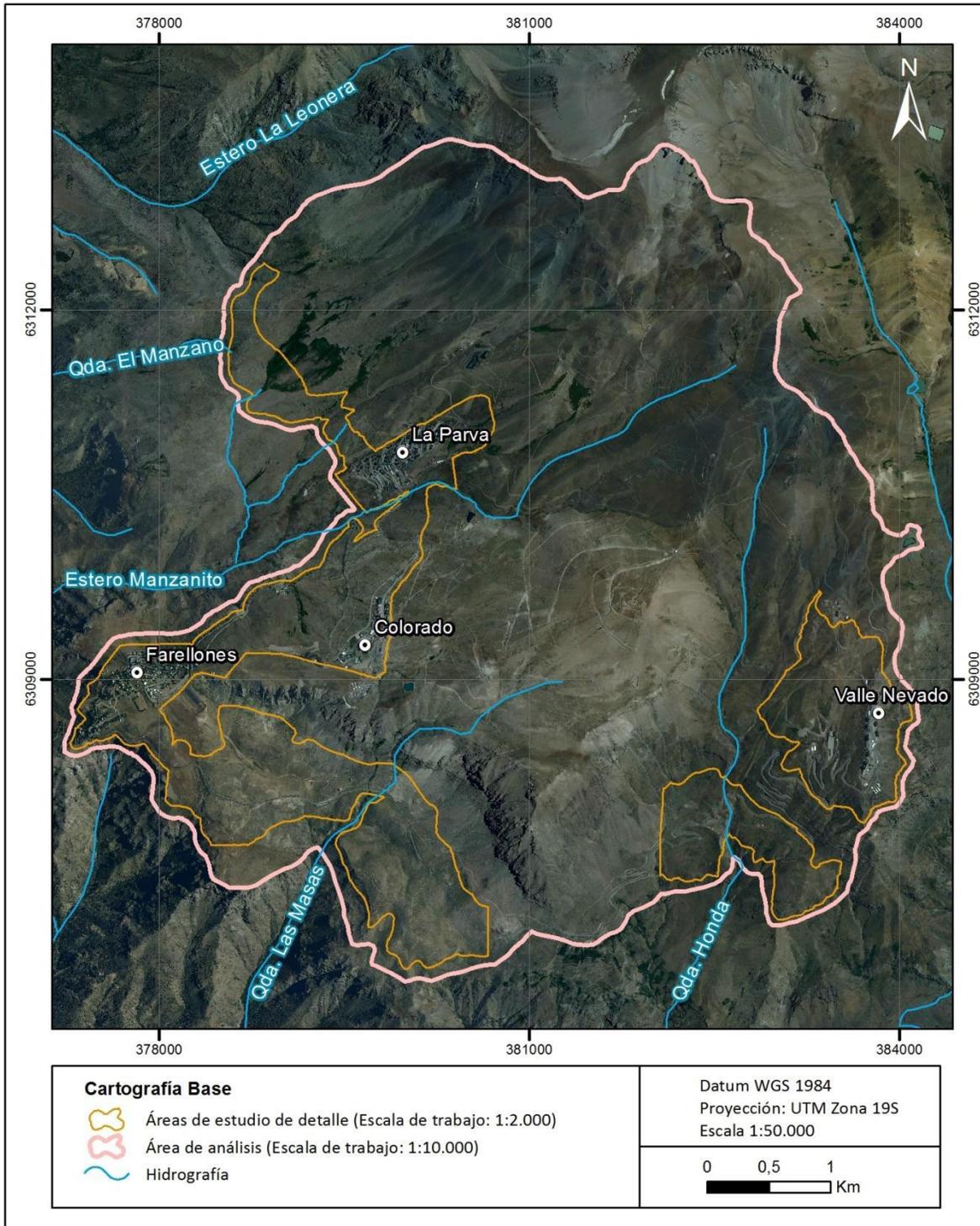
2.2.1 Definición de áreas de estudio y escala de trabajo

En este Estudio, se considera el análisis a escala 1:2.000 de tres áreas (en adelante “áreas de estudio de detalle”) que circunscriben a las áreas urbanas del Centro Cordillera de la comuna de Lo Barnechea. A modo de referencia, estas áreas comprenden las localidades de Valle Nevado, Farellones, Colorado y La Parva, junto con el Estero Manzanito-Barros Negros y las Quebradas Las Masas y Honda (FIGURA N° 2-2).

Adicionalmente, se considera el análisis a escala 1:10.000 del área ubicada aguas arriba de las áreas de estudio de detalle, hasta la divisoria de aguas (en adelante “área de análisis”), con el fin de

identificar peligros que podrían ser generados aguas arriba de las áreas urbanas y que podrían afectarlas por alcance.

FIGURA N° 2-2 Definición de áreas de estudio



Fuente: Elaboración propia.

2.2.2 Elaboración de la línea de base geológica y geomorfológica

Las caracterizaciones geológica y geomorfológica se realizaron simultáneamente, utilizando como base la información recopilada a partir de las siguientes actividades (ver FIGURA N° 2-1).

2.2.2.1 Recopilación Bibliográfica.

Se usó como base los trabajos de tesis de Rauld (2002) y Quiroga (2013) y publicaciones científicas de diversos autores, complementado con la información del Mapa Geológico de Chile a escala 1:1.000.000 desarrollado por SERNAGEOMIN (2003). El análisis y evaluación de las estructuras geológicas se realizó a partir de la información bibliográfica disponible: PMA-GCA (2008) y SERNAGEOMIN (2003).

2.2.2.2 Visitas Técnicas al área de estudio.

Las actividades realizadas durante las visitas a terreno con enfoque geológico-geomorfológico se detallan en la Sección 2.2.4.1.

2.2.2.3 Análisis morfométricos

A partir de la información topográfica proporcionada por el mandante, se generaron dos modelos de elevación digital (DEM, por su sigla en inglés): (1) para las áreas de estudio de detalle, se generó un DEM con un tamaño de celda de 3x3 a partir de cotas y curvas de nivel (separadas cada 1 metro) obtenidas de la información topográfica a escala 1:1.000; (2) para el área de análisis, se generó otro DEM con un tamaño de celda de 5x5 a partir de curvas de nivel (separadas cada 10 metro) obtenidas de la información topográfica a escala 1:1.000 y de cotas y curvas de nivel (separadas cada 1 metro) obtenidas de la información topográfica a escala 1:1.000.

A partir de los modelos de elevación digital generados, se derivaron las cartas de diferentes parámetros morfométricos: cartas de relieve sombreado, carta de pendiente y carta de exposición de ladera. Estos mapas se utilizaron como apoyo para la identificación de las principales formas del terreno (geomorfología) y los depósitos no consolidados.

2.2.2.4 Interpretación de fotografías aéreas e imágenes satelitales.

Las fotografías aéreas recopiladas corresponden a las siguientes:

- Vuelo SAF Vuelo CH-60, año 1978 y escala 1:60.000.
- Vuelo SAF FONDEF, año 1995 y escala 1:20.000.

Además se compilaron y revisaron los catálogos de Imágenes de *Google Earth*® y *Bing Maps*®, que cubren distintos períodos de tiempo desde el año 2003, con casi 10 años de registro. Se consideraron principalmente aquellas de los años 2009 y 2013.

Las imágenes satelitales y fotografías aéreas recopiladas fueron analizadas, con el objetivo de complementar la información obtenida en terreno, la recopilación bibliográfica y los análisis morfométricos. La interpretación de imágenes satélites permitió delimitar los principales contactos entre el basamento rocoso y depósitos no consolidados activos e inactivos, tales como depósitos aluviales, depósitos coluviales, depósitos lacustres y depósitos glaciales, se identificaron las formas presentes y se calcularon los parámetros morfométricos.

2.2.2.5 Identificación y caracterización de unidades geológicas y geomorfológicas

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

- Unidades de Roca: Corresponden a los afloramientos rocosos, los que son clasificados de acuerdo a su edad y litología, y cuando es posible, respecto a la calidad geotécnica del macizo rocoso.
- Depósitos Sedimentarios: Corresponde a sedimentos, total o parcialmente consolidados. Al desarrollar el mapa geológico se da énfasis en los depósitos sedimentarios dado que son el producto de procesos de remoción en masa e inundaciones, esto es, depósitos aluviales activos e inactivos, depósitos fluviales activos e inactivos, depósitos coluviales y las zonas de generación de coluvios.
- Depósitos Volcánicos recientes, producto de erupciones volcánicas, tales como depósitos de caída de ceniza, depósitos de flujos piroclásticos, depósitos de lahares y coladas de lava.

Dado que las coberturas geológicas del área se encuentran a una escala menor a la elegida en la definición del área de estudio, fue necesario realizar un aumento de escala de la cartografía geológica disponible. El aumento de escala fue realizado a partir de las visitas a terreno junto con la interpretación de fotografías aéreas e imágenes satelitales, y el análisis de las cartas morfométricas elaboradas.

La caracterización geomorfológica identifica las principales formas del terreno. En consideración de la información disponible, el mapa geológico y geomorfológico es presentado como un solo mapa.

El mapa geológico y geomorfológico es utilizado en este informe como un factor condicionante, dado que permite identificar las siguientes zonas:

- Zonas donde el macizo rocoso presenta una mala calidad que favorece la generación de procesos de remoción.
- Zonas donde se producen continuamente procesos de remoción en masa, tales como zonas de abanicos aluviales o conos de deyección coluviales.
- Zonas escarpadas, donde se producen continuamente procesos de remoción en masa que generan retroceso de laderas.
- Zonas bajas y deprimidas, las que son afectadas periódicamente por anegamientos.

2.2.3 Elaboración de la línea de base de hidrología y crecidas

Para la elaboración de la línea de base del estudio hidrológico, se efectuaron las siguientes actividades:

- Revisión de antecedentes
- Delimitación de cuencas
- Caracterización de quebradas y definición de caudales de crecida

2.2.3.1 Revisión de Antecedentes

En primer lugar se realiza una revisión de antecedentes que aporten información relacionada con la determinación de eventos máximos. Además esta revisión incluye los antecedentes hidrológicos existentes, así como la estadística hidrológica de las estaciones hidrométricas cercanas a la zona, considerando datos fluviométricos y meteorológicos.

2.2.3.2 Delimitación de cuencas

Se trazaron los límites de las cuencas y la red de drenaje y se definieron parámetros morfológicos de las cuencas asociadas a quebradas a caracterizar.

2.2.3.3 Caracterización de quebradas y definición de caudales de crecida

Se realizó una caracterización de las quebradas identificadas informando acerca de trazados, tipo de lecho, pendientes. Se analizó las estadísticas fluviométricas cercanas a la zona de estudio y su representatividad a lo que se le realizó un análisis de frecuencia. Debido a que no existe información fluviométrica en las quebradas se utilizó la transposición de área, para la determinación de caudales en los puntos de interés.

A partir del análisis de frecuencia se definieron caudales de crecida para períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años para cada una de las quebradas de interés, los que serán utilizados para la zonificación de inundaciones a partir de los análisis hidráulicos.

2.2.4 Visitas técnicas al área de estudio

Durante octubre y noviembre de presente año, se realizaron cinco visitas a terreno al área de estudio con distintos enfoques: (1) geológico-geomorfológico, (2) hidrológico-hidráulico y (3) actividades o intervención humana. Las paradas y recorridos realizados en ellas se muestran en la FIGURA N° 2-3. A lo largo del recorrido, se realizaron observaciones de detalle que fueron registradas mediante fotografías y en planos. A continuación, se detallan las actividades realizadas en las visitas a terreno:

2.2.4.1 Visita a terreno con Encargado de Emergencias

Se realizó una visita a terreno el día 27 de octubre de 2015 con el Encargado de Emergencias de la Municipalidad de Lo Barnechea, el Sr. Edgardo Zenteno, y con el funcionario Sr. Gerardo Silva (geógrafo con experiencia en el manejo de situaciones de emergencia en la comuna), para visitar aquellos lugares donde se tuvieran antecedentes de la ocurrencia de los peligros geológicos estudiados. Además del personal de la municipalidad, esta visita participaron las siguientes personas:

- Vicente Letelier C., Geólogo
- Rodrigo Luca, Geólogo
- Felipe García-Huidobro C., Geólogo
- Scarlett Vásquez P., Ingeniera Civil Hidráulica

2.2.4.2 Visitas a terreno con enfoque Geológico-Geomorfológico

Se realizaron cuatro visitas a terreno a las áreas de estudio de detalle con un enfoque geológico-geomorfológico: los días 27 de octubre, 17 de noviembre, 25 de noviembre de 2015 y 21 de enero de 2016 (FIGURA N° 2-3). Estas visitas fueron realizadas con énfasis en los siguientes objetivos:

1. Recaudar información sobre eventos vinculados a la ocurrencia de remociones en masa, avalanchas de nieve y/o inundaciones en el sector.
2. Identificar rasgos geomorfológicos relacionados con los peligros geológicos existentes, como cicatrices de deslizamientos, abanicos aluviales, escarpes, etc.
3. Complementar y validar la información geológica obtenida en la recopilación bibliográfica.
4. Validar la zonificación preliminar de susceptibilidad de peligros geológicos.
5. Identificar sitios de interés geológicos.

El equipo participante fue el siguiente:

- Rodrigo Rauld P., Geólogo
- Constanza Urresty V., Geóloga
- Vicente Letelier C, Geólogo

2.2.4.3 Visita a terreno con enfoque Hidrológico-Hidráulico

El día jueves 5 de noviembre de 2015 se realizó una visita a la zona de estudio con enfoque hidrológico-hidráulico (FIGURA N° 2-3) para visualizar en terreno las características de la morfología de las cuencas, las coberturas, los tipos de suelo, y un catastro de las quebradas que atraviesan la zona de estudio, registrando sus principales características respecto a rugosidades, tipo de lecho, granulometría, entre otros. El detalle de lo realizado en cada parada se explica en el ANEXO UU.

El equipo participante fue el siguiente:

- Scarlett Vásquez P., Ingeniera Civil Hidráulico
- Paulina Rodríguez, Ingeniera Civil Hidráulico
- Gonzalo Jiménez, Ingeniero Civil Hidráulico

2.2.4.4 Visita a terreno con enfoque en Actividades e Intervención Humana

El día jueves 11 de noviembre de 2015 se realizó una visita a la zona de estudio con enfoque en actividades e intervención humana. La preparación para este terreno consistió en realizar: (1) una revisión bibliográfica de documentos DGAC, SISS, SEIA, CONAF, entre otros; (2) una entrevista telefónica con el Secretario de la Corporación de Adelanto de Farellones, Sr. José Ignacio Figueroa Elgueta, en donde se consultó sobre los principales problemas que presenta el área de estudio; fotointerpretación de los riesgos antrópicos; y una sistematización de los riesgos en terreno.

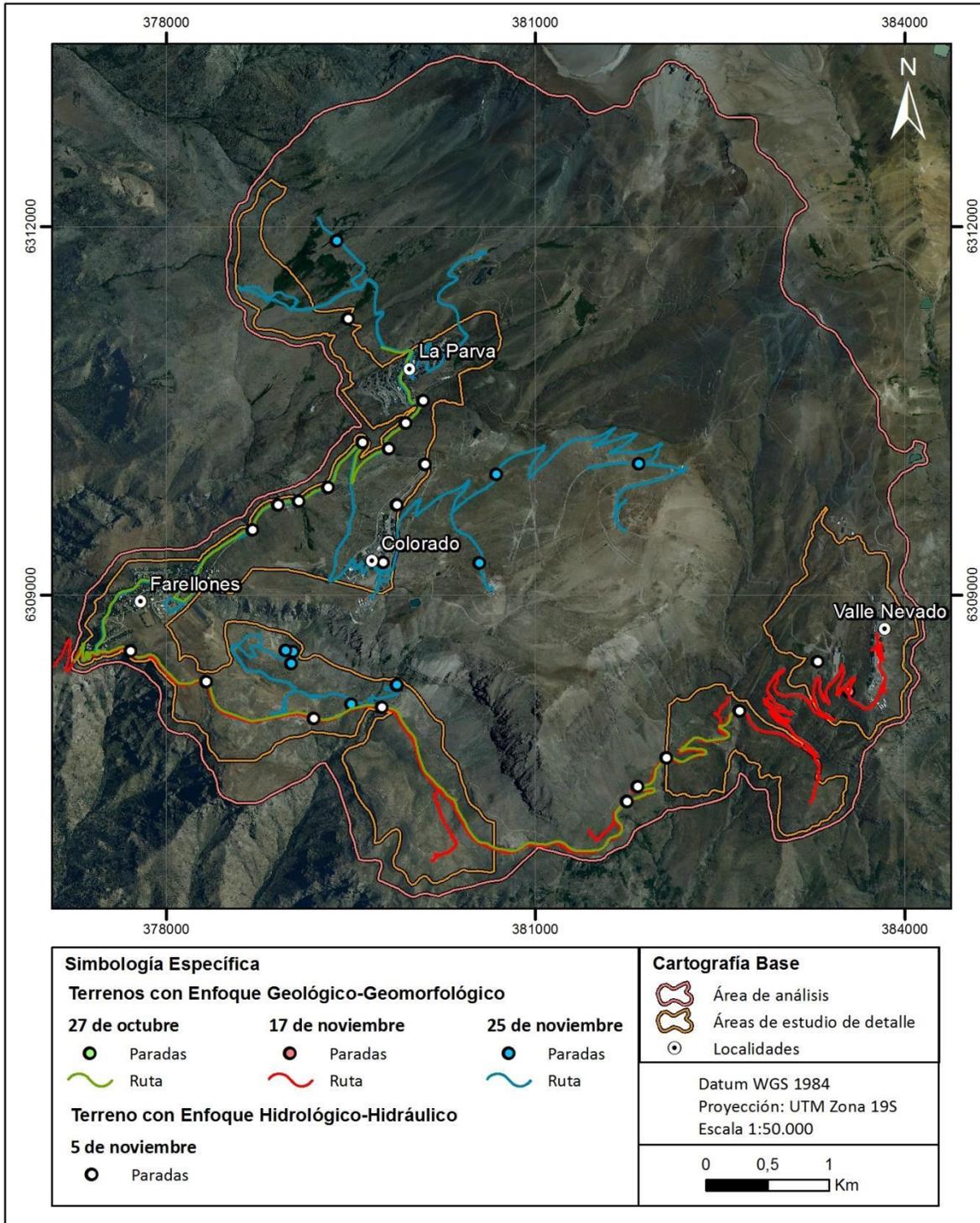
Las actividades realizadas durante el terreno fueron las siguientes:

1. Se recorrieron los cuatro centros de ski y sus alrededores en donde se realizó una inspección visual de los riesgos antrópicos previamente catastrados en el siguiente orden: Farellones, La Parva, El Colorado y Valle Nevado.
2. Se realizó una caminata de 45 minutos a una de las piscinas de acumulación de agua para la elaboración de nieve artificial, localizada al oriente de los centros El Colorado y La Parva.
3. Se agregó dentro de los riesgos los muros de contención de la ruta G-21 en torno a las últimas curvas antes de llegar a Farellones.
4. Se corroboró la localización de Helipuertos y Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas.

El equipo participante fue el siguiente:

- Catherine Barra, Cartógrafa
- Inés Nery, Arquitecto
- Maximiliano Salazar, Ingeniero Civil en Geografía
- Arturo Carrión, Geógrafo

FIGURA N° 2-3 Recorrido realizado durante las visitas a terreno a las áreas de estudio de detalle entre octubre y noviembre del 2015.



Fuente: Elaboración propia.

2.2.5 Elaboración del catastro de sitios de interés geológico

El catastro de sitios de interés geológico se realizó considerando dos actividades:

1. Se realizó una recopilación de antecedentes bibliográficos de sitios de interés geológicos propuestos en el área de interés de este estudio por otros autores. En el inventario de patrimonios geológicos en la ciudad de Santiago realizado por Rodríguez (2013), se encontró un sitio propuesto en el área de estudio.
2. Durante las visitas a terreno se identificaron 3 sitios de interés geológico.

La información recopilada es presentada en el Capítulo 2.4 “Catastro de sitios de interés geológico” y en el ANEXO VV.

2.2.5.1 Elaboración del catastro de peligros geológicos

El catastro de peligros geológicos se realizó con base en una recopilación de antecedentes bibliográficos y registros históricos, análisis de fotografías aéreas, información contenida en la línea de base de geología y geomorfología y trabajo de terreno. Los peligros geológicos catastrados corresponden a aquellos contenidos dentro del artículo 2.1.17 de la OGUC, y fueron tratados con los nombres explicados en el apartado 2.1.3 “Marco jurídico y nomenclatura utilizada en este informe”, resumidos en el

CUADRO N° 2-1.

Los peligros geológicos analizados corresponden a:

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

Para la elaboración del catastro, se realizaron las siguientes actividades:

2.2.5.2 Recopilación bibliográfica

Esta actividad incluyó tanto la recepción de la información provista por el mandante como la búsqueda de antecedentes en otras instituciones. Para la recopilación de información, se revisaron diversas fuentes que incluyen publicaciones científicas e información generada por entidades públicas (SERNAGEOMIN, MOP, DGA, MINVU, etc.). Las fuentes bibliográficas consultadas para catastrar cada tipo de peligro geológico fueron las siguientes:

1. Catastro de sismos e intensidades reportadas para distintos terremotos históricos. La generación del catastro de eventos sísmicos se realizó en base a recopilaciones históricas y de publicaciones científicas. La base de datos de sismos utilizada para las representar los sismos históricos de la región es del catálogo elaborado por el 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 asociado a dichos datos es del orden de 50 km, pero dada la cantidad de datos y la extensión temporal de su registro resulta útil para representar la sismicidad a escala regional.
2. Catastro de centros volcánicos. Para los eventos volcánicos se revisaron las fechas de registro de actividad y catastros de centros volcánicos presentados en Urrutia y Lanza (1993), González-Ferrán (1995) y la información del SERNAGEOMIN (2003) sobre la distribución de los productos volcánicos antiguos que han afectado los alrededores de la zona de estudio.
3. Catastro histórico de fenómenos de remociones en masa. Se recopilaron datos de los procesos de remoción en masa a partir de la revisión bibliográfica de Urrutia y Lanza (1993) y de la base de datos del catálogo DESINVENTAR³ (Sistema de Inventario de Efectos de Desastres). Además, se obtuvo información a través de comunicación oral con el Encargado de Emergencias Municipal.
4. Catastro histórico de fenómenos de inundaciones en la zona. Se recopiló información con personal de emergencia de la Municipalidad de Lo Barnechea, con el que se realizó un recorrido en terreno para visitar puntos en que se tenían antecedentes de inundaciones.

La información recopilada es presentada en el Capítulo 2.5 “Catastro de peligros geológicos”.

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

³ Disponible en línea en: <http://online.desinventar.org/>

2.2.5.3 Análisis e interpretación de fotografías aéreas e imágenes satelitales

Se analizaron 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.

2.2.5.4 Interpretación de la geología y geomorfología

Se interpretó preliminarmente, en base a las unidades litológicas y a los parámetros morfométricos, cuáles son las zonas más expuestas a la ocurrencia de los distintos peligros geológicos analizados. Adicionalmente se identificaron los depósitos generados por los distintos procesos (remociones en masa e inundaciones), pues estos permiten representar el alcance de estos.

2.2.5.5 Trabajos en terreno

Se revisaron en terreno los sectores que presentan evidencia de ocurrencia de los distintos procesos analizados.

2.2.5.6 Digitalización de sectores con evidencia de ocurrencia de peligros geológicos

La ubicación de los sectores con evidencias de ocurrencia de peligros geológicos fueron digitalizados y georeferenciados en un Sistema de Información Geográfico, generando, como resultado, el mapa de catastro de peligros geológicos.

2.2.6 Zonificación de susceptibilidad de los peligros geológicos

2.2.6.1 Peligro Volcánico

Para la caracterización del volcanismo se identificaron los centros volcánicos ubicados cerca del área de estudio (hasta una distancia aproximada de 100 km), indicando cuáles de ellos se encuentran activos. A continuación, se identificó, en base a los mapas de peligro volcánico de la Región Metropolitana, elaborados por el SERNAGEOMIN (Orozco, et al., 2013; Silva & Bertin, 2012), los peligros que podrían afectar al área de estudio.

2.2.6.2 Peligro de Remociones en Masa

Con base en la integración de las líneas de base geológica y geomorfológica, y del catastro de peligros geológicos, se desarrolló un análisis cuantitativo y cualitativo, con el objetivo de identificar los factores que están condicionando la ocurrencia de eventos de remociones en masa. Una vez determinados los factores condicionantes, se establecieron los criterios de zonificación según se indica a continuación.

- Deslizamientos: se implementó el Modelo Peso de la Evidencia para determinar las zonas de generación, y un modelo de alcances en GIS para determinar las zonas de alcances.
- Caída de bloques: se integraron rasgos geológicos y geomorfológicos para determinar las zonas de generación, y se implementó un modelo de alcances en GIS para determinar las zonas de alcances.
- Flujos de detritos: se tomaron en consideración aspectos geológicos y geomorfológicos.
- Retroceso de laderas: se tomaron en consideración aspectos geológicos y geomorfológicos.

2.2.6.3 Peligro de Anegamientos

El peligro de anegamientos fue evaluado mediante la integración de las líneas de base geológica y geomorfológica, y del catastro de peligros geológicos. La determinación de las zonas susceptibles fue mediante procedimientos cualitativos.

2.2.6.4 Peligro de Avalanchas de Nieve

Utilizando la topografía disponible e imágenes satelitales del área de estudio (Sector Centro Cordillera Comuna de Lo Barnechea, que incluye Farellones, La Parva, El Colorado y Valle Nevado), se determinaron las sendas de avalanchas y las zonas de inicio, recorrido y depósito, considerando los siguientes rangos de pendientes para cada zona antes mencionada:

Zona de inicio: se consideró un rango máximo de pendiente entre 20° y 50°, esto debido a que la zona de estudio es considerada área urbana y que las laderas que se encuentran en este rango de pendientes concentran la mayor probabilidad de presentar fenómenos de avalancha y deslizamientos de nieve. En el rango entre 20° y 30° dichos procesos se consideran ocasionales, entre 30° y 40° se presenta la mayor frecuencia y entre 40° y 50° son frecuentes.

Zona de recorrido: se consideró un rango de pendiente entre 15° y 20°, pudiéndose considerar hasta los 25°. Con estos ángulos una avalancha sería difícil que se originara y tampoco se detendría.

Zona de depósito o despliegue: se consideró que con una pendiente menor a 15° se produce una desaceleración de la avalancha y se genera su depositación natural y su eventual detención. En mucha de las sendas de avalanchas de nieve determinadas, la zona de depósito quedó determinada por el cauce de flujos de agua, quebradas y sendas de avalanchas mayores.

Las sendas de avalanchas definidas en el área de estudio son confinadas a quebradas con una o más zonas de inicio o abiertas, asociadas a la forma de las laderas principalmente. Se determinó la forma de la ladera, diferenciando entre laderas rectas, cóncavas, convexas o la combinación de las anteriores. La determinación de estos parámetros tiene implicaciones en la capacidad que tiene la ladera para acumular nieve y a consecuencia de ello la generación de avalanchas de nieve.

Se determinó el área en m², de cada senda de avalanchas, para su clasificación según magnitud o masa de la avalancha de nieve que puede afectar el área de estudio.

Se determinó la distancia recorrida de las avalanchas en las sendas, en todas las sendas se observaron los posibles ejes de caída de las avalanchas de nieve, destacando el eje principal.

Se debe mencionar, que a la fecha no se cuenta con datos nivometeorológicos, que ayuden a caracterizar mejor la climatología de la zona de estudio. Esta se determinó en base a referencias bibliográficas.

Hay que destacar que existen limitaciones básicas en este estudio que se refieren principalmente a la escasa observación que existe de la ocurrencia de avalanchas de nieve en el área, y a la ausencia de observaciones de nieve y climatológicas en el área de estudio y en la zona de inicio de las avalanchas de nieve.

Para la caracterización de la susceptibilidad del peligro de avalanchas de nieve, se utilizó la identificación de las sendas de avalanchas de nieve ubicadas en el área de estudio y sus distintas zonas, generación, recorrido y depósito de las avalanchas de nieve. La susceptibilidad asociada a cada una de las sendas identificadas, se estimó, contrastando varias propiedades de las sendas relacionadas con su morfología.

2.2.6.5 Peligro de Inundaciones

Con base en las quebradas identificadas y a los caudales estimados para los distintos periodos de retorno, se determinaron aquellas quebradas que representan un peligro desde el punto de vista de la inundación, a partir de un análisis hidráulico.

Se realizó una zonificación tomando en cuenta los resultados de los modelos hidráulicos, que proporcionan zonas, las que se simplifican otorgando un ancho uniforme por quebrada que contiene las inundaciones para T=200 años.

2.2.6.6 Peligro Sísmico

Para la caracterización preliminar de la sismicidad, se identificaron y describieron los mecanismos que pueden generar sismos en el área de estudio. Posteriormente, se determinó la respuesta sísmica cualitativa de las unidades identificadas en el levantamiento geológico-geomorfológico. A partir de las características de estas unidades y su comparación con resultados de trabajos científicos (Allen & Wald, 2007; Wald & Allen, 2007; Wills & Clahan, 2006) fue posible determinar una respuesta sísmica asociada a cada una de las unidades.

2.3 Línea de base

2.3.1 Marco geodinámico

Chile se ubica en un margen convergente de placas tipo océano-continente (FIGURA N° 2-4), donde la Placa Oceánica de Nazca subducta a la Placa Continental Sudamericana bajo su margen occidental. Esta subducción, cuya tasa actual de convergencia se estima en 8 cm/año (DeMets, et al., 1994), se reconoce activa desde, al menos, el Jurásico (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 segmento ubicado entre los 33° y los 46° S corresponde, dentro del esquema de segmentación andina de Mpodozis y Ramos (1989), a una zona de subducción tipo chilena que se caracteriza por un ángulo de subducción entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana de aproximadamente 30°. Este segmento se encuentra al Sur del segmento ubicado entre los 27° S y los 33°, que se caracteriza por una subducción plana (~10°) y se encuentra aparentemente controlado por la subducción de la dorsal asísmica de Juan Fernández. Si se comparan ambos segmentos, se destacan las siguientes características:

La costa Oeste de la placa Sudamericana tiene un rumbo aproximado Norte-Sur en el tramo de subducción plana, mientras que al Sur de los 33° la costa posee un rumbo aproximado N20°E.

1. En el tramo Norte, no se aprecia el desarrollo de una depresión central, en cambio se presentan valles transversales en el antearco. Por otro lado, en el segmento Sur, se desarrolla claramente la Depresión Central, con una Cordillera de la Costa y Cordillera Principal bien definidas.
2. En el sector de subducción plana no hay registro de volcanismo Holoceno en la Cordillera Principal, mientras que desde el área de estudio y hacia el sur, el arco volcánico Holoceno se encuentra plenamente desarrollado.

La acumulación y posterior relajación de los esfuerzos producto del régimen de subducción es la causa de que todo Chile hasta la península de Taitao, sea afectado frecuentemente por terremotos. La gran mayoría de estos sismos y los eventos de magnitud, se originan en la zona del contacto entre placas y corresponden a la liberación súbita de la mayor parte de la energía acumulada durante el proceso de subducción (Ej. Sismos del 6 de abril de 1943 que afectó a la IV Región, 3 de Marzo de 1985 de la V región, sismos de Mayo de 1960 en Valdivia). Los esfuerzos causados por la subducción también se propagan hacia el interior de la placa continental, y se liberan mediante sismos superficiales, normalmente de menor magnitud pero más destructivos localmente. (Ej. Sismo de Las Melosas de 1958, Sismo de Chuzmisa de 2001). Otros sismos son provocados por la relajación de esfuerzos en la placa de Nazca una vez subductada, estos sismos pueden ser muy destructivos a pesar de no tener las mayores magnitudes (Ej. Sismo de Chillán de 1939, sismo de Punitaqui de 1997 y sismo de Tarapacá 2005).

En la figura siguiente se aprecia la Dorsal de Juan Fernández y el lugar donde es subductada frente a los 33° S. La línea verde señala la fosa, lugar donde subducta la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, las flechas muestran las direcciones y velocidades de convergencia entre ambas placas

FIGURA N° 2-4 Vista en 3D donde se representa el marco geodinámico



Fuente: Elaboración propia

2.3.2 Marco geomorfológico

2.3.2.1 Unidades morfoestructurales

A lo largo del borde occidental de Sudamérica existe una segmentación morfoestructural, formada por una serie de procesos geotectónicos debido a la interacción entre la placa de Nazca y la placa continental Sudamericana (Isacks, 1988). El segmento andino chileno ubicado al sur de los 33° S, muestra 3 unidades morfoestructurales principales, dispuestas en franjas orientadas Norte – Sur. De oeste a este, estas son: Cordillera de la Costa, Depresión Central y Cordillera Principal (que comparten Chile y Argentina).

La Cordillera de la Costa está compuesta por cerros que rara vez sobrepasan los 2.000 m s.n.m. Formada principalmente por granitoides del Paleozoico Superior en su flanco occidental y por secuencias volcánicas y sedimentarias Mesozoicas en la parte más oriental (Sellés & Gana, 2001; SERNAGEOMIN, 2003).

La Depresión Central se extiende desde los 33° S hasta los 40° S, y corresponde a una cuenca rellena por depósitos aluviales Pleistocenos a Holocenos principalmente, que localmente superan los 500 m de espesor (Thiele, 1980; Araneda, et al., 2000; Rauld, 2002). Esta unidad se presenta como una extensa llanura levemente inclinada hacia el oeste, ocasionalmente interrumpida por zonas donde se une la Cordillera de la Costa con la Cordillera Principal (angosturas) y por algunos cerros islas, cuyas alturas no superan los 250 m con respecto a la Depresión Central.

La Cordillera Principal se puede dividir en dos franjas: la Cordillera Principal Occidental, conformada por rocas cenozoicas de las Formaciones Abanico y Farellones, principalmente; y la Cordillera Principal oriental que, además de contener las rocas cenozoicas anteriormente nombradas, exhibe rocas mesozoicas fuertemente deformadas.

El área de análisis este estudio se ubica en la Cordillera Principal Occidental (FIGURA N° 2-5), con elevaciones que fluctúan entre los 2.200 y 3.200 m s. n. m.

2.3.2.2 Morfometría

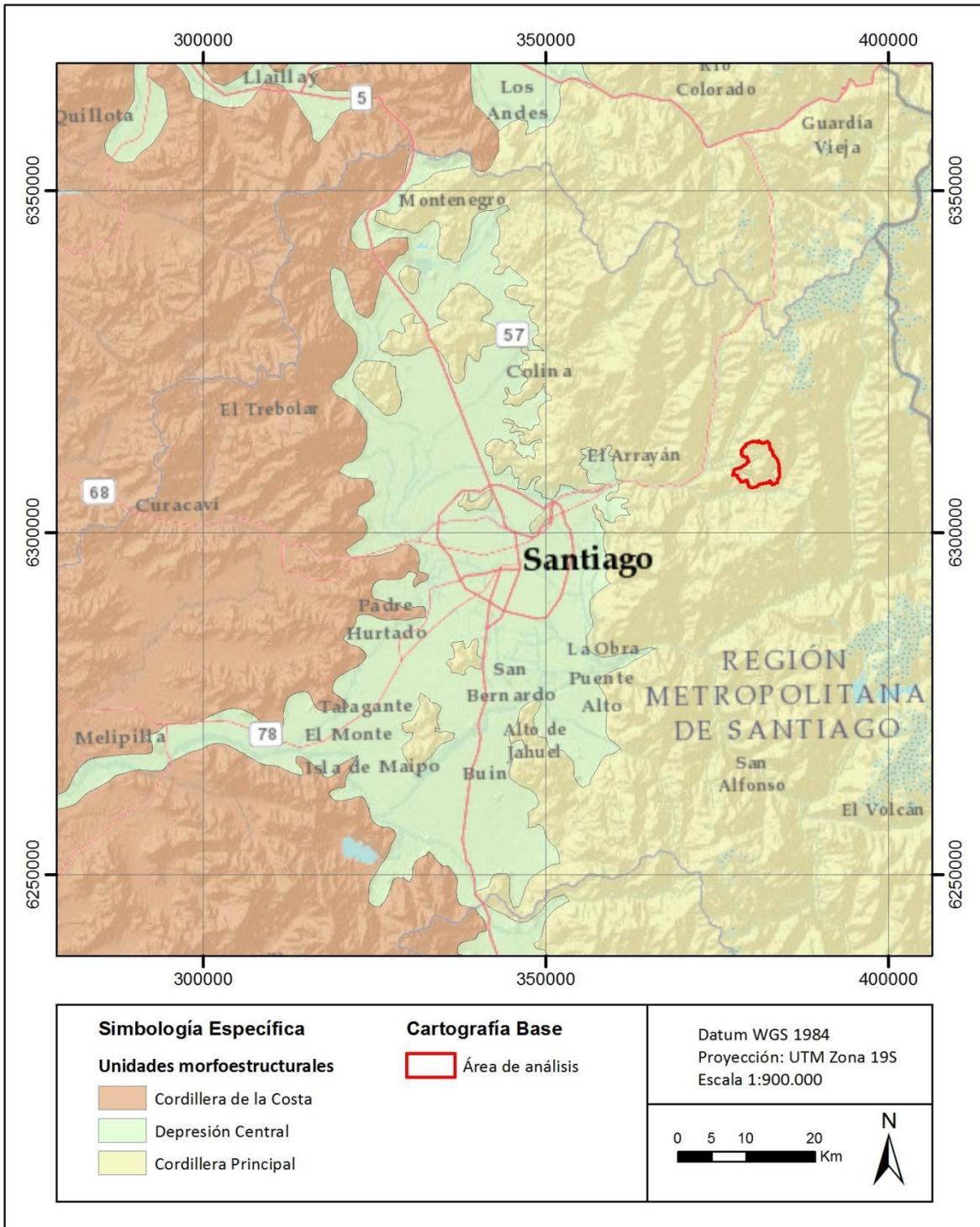
Se calcularon los parámetros morfométricos (elevación, pendiente y exposición) en base al DEM construido según lo descrito en la sección 2.2.2.3.

La elevación (FIGURA N° 2-6) varía entre 2.179 y 3.242 m s. n. m., y aumenta desde el suroeste hacia el noreste, con su punto más bajo cerca de Farellones.

La pendiente (FIGURA N° 2-7) es muy variable, y su valor más alto es del orden de 78°. Las menores pendientes se encuentran al norte de La Parva, al este y al oeste de Colorado y al sureste de Farellones. Desde la Parva y Colorado, la pendiente aumenta progresivamente hacia el noreste, hasta alcanzar pendientes mayores que 40° en el límite del área de estudio. Otra zona de alta pendiente corresponde a un farellón ubicado al sur de Colorado, entre Farellones y Valle Nevado.

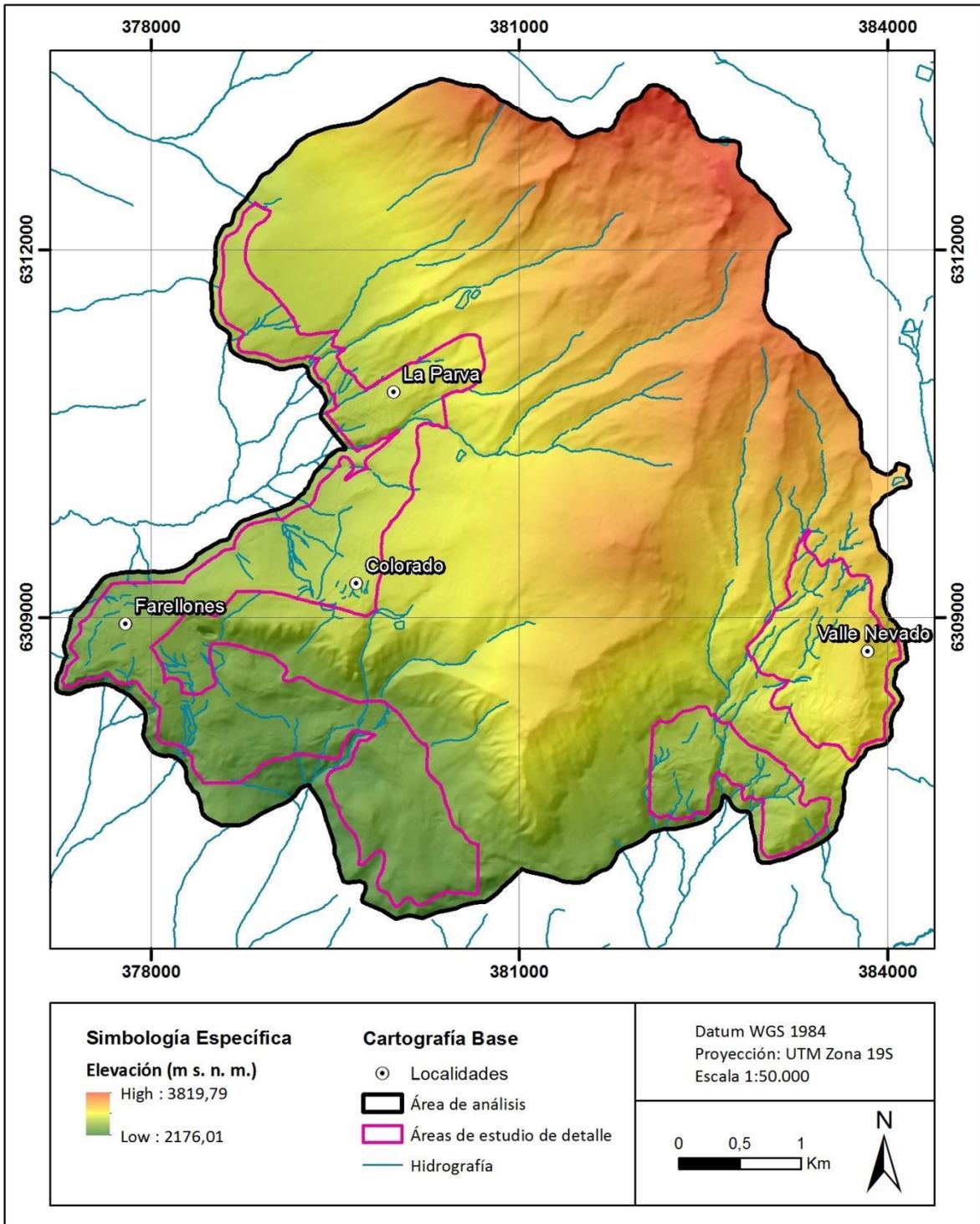
Finalmente, en cuanto a la exposición (FIGURA N° 2-8), domina en la mayor parte del área de estudio las orientaciones suroeste, oeste y sur, concordantemente con lo que ocurre con la distribución de la elevación, y sólo localmente se presentan otras orientaciones, como ocurre al norte de Colorado, donde domina la orientación noroeste, y al oeste de Valle Nevado, donde existe una gran ladera de orientación sureste.

FIGURA Nº 2-5 Principales unidades morfoestructurales



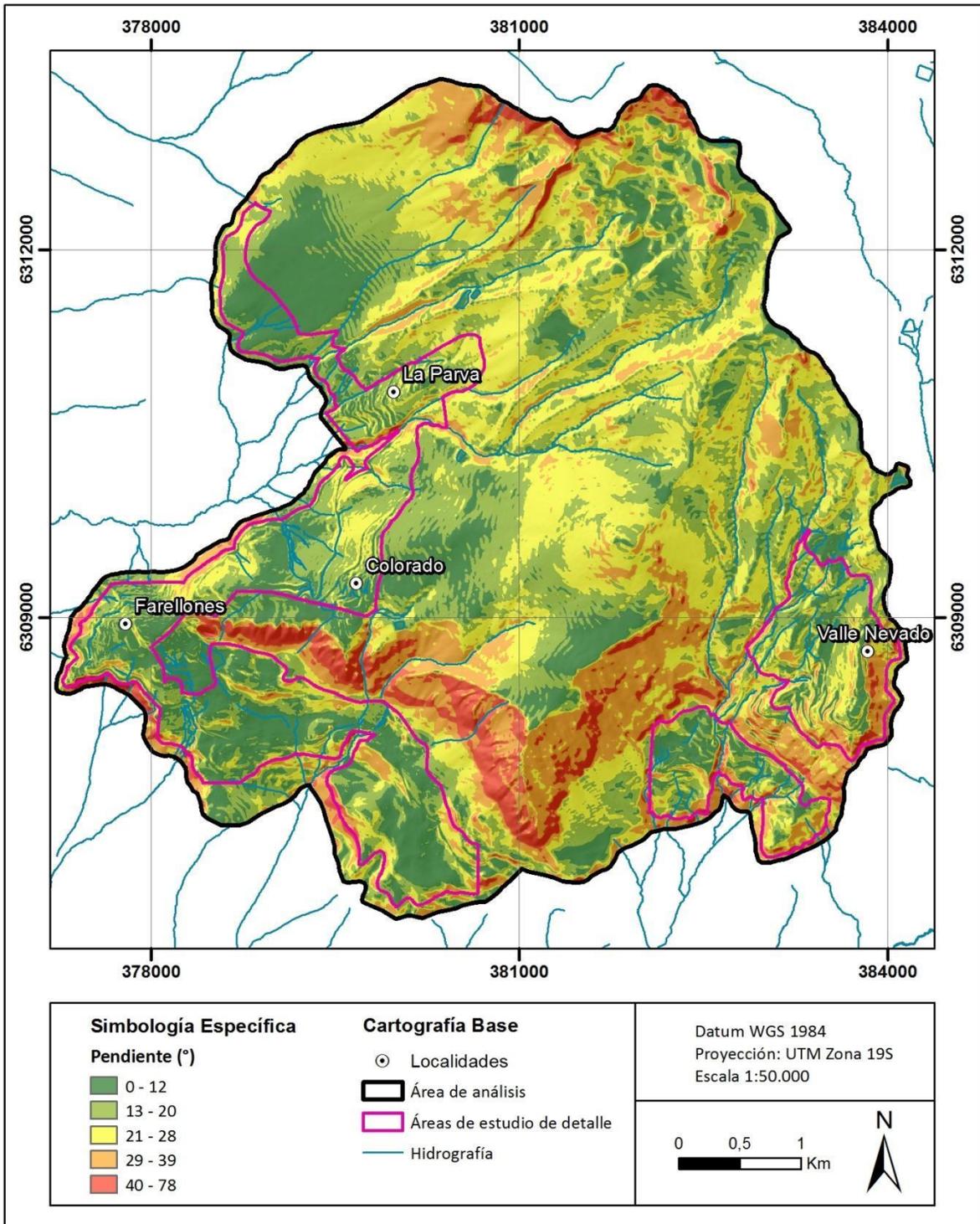
Fuente: Elaboración propia

FIGURA N° 2-6 Carta de elevaciones del área de análisis de este estudio.



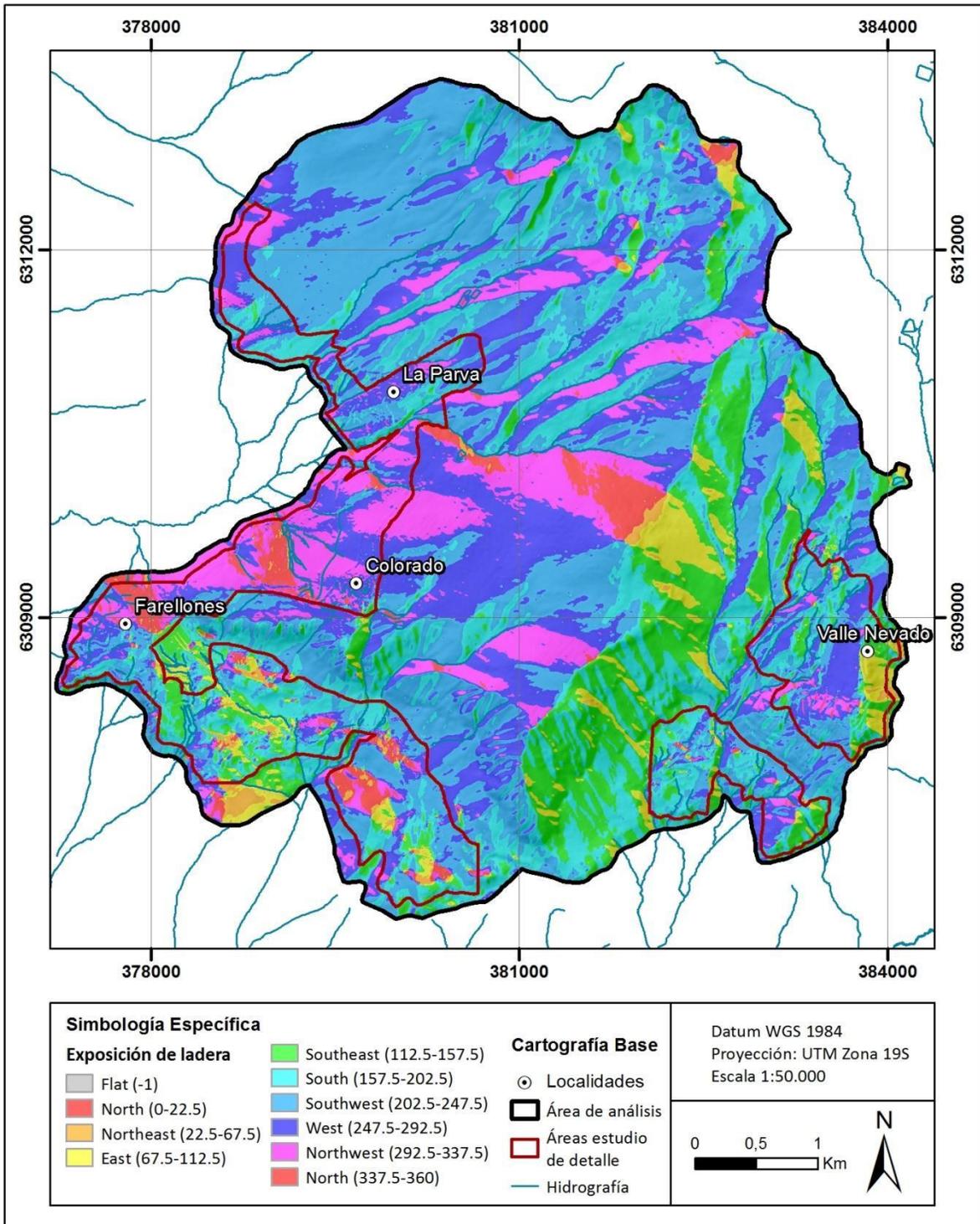
Fuente: Elaboración propia

FIGURA N° 2-7 Carta de pendientes del área de análisis de este estudio.



Fuente: Elaboración propia

FIGURA N° 2-8 Carta de exposición de laderas del área de análisis de este estudio.



Fuente: Elaboración propia

2.3.2.3 Formas reconocidas

Las formas reconocidas en el área de análisis están integradas en el levantamiento geológico-geomorfológico, presentado en la sección 2.3.3.2 “Marco geológico – geomorfológico local”.

2.3.3 Marco geológico

2.3.3.1 Marco geológico regional

El área de análisis, desde la perspectiva de un contexto regional, presenta unidades de roca que registran un período de tiempo geológico acotado, que va desde el Eoceno-Oligoceno hasta la actualidad, y en las que se identifican todos los tipos litológicos mayores, como son rocas sedimentarias, volcánicas, intrusivas y metamórficas (FIGURA N° 2-9). Inmediatamente hacia el este, afloran rocas más antiguas, las que corresponden a secuencias volcanosedimentarias mesozoicas.

Estudios previos sugieren que durante el Eoceno-Oligoceno se habría depositado una potente secuencia volcanosedimentaria, la Formación Abanico, en un sistema de cuencas extensionales y/o subsidentes, probablemente orientadas norte-sur, las que posteriormente fueron invertidas tectónicamente durante el Mioceno, mientras se depositaba otra secuencia volcanosedimentaria, la Formación Farellones (Charrier, et al., 1994; Charrier, et al., 1996; Charrier, et al., 2002; Godoy & Lara, 1994; Kay & Kurtz, 1995; Godoy, et al., 1999; Jordan, et al., 2001; Giambiagi, et al., 2003). Cabe destacar que la Formación Abanico presenta un plegamiento mucho más intenso que la sobreyacente Formación Farellones, lo que permite reconocer una discordancia entre ambas formaciones.

También en el contexto regional afloran cuerpos intrusivos de edad cenozoica, que se pueden caracterizar como franjas N-S que disminuyen en edad hacia el este (Thiele, 1980; Fock, 2005; Farías, et al., 2008), definiéndose la franja de intrusivos del Mioceno inferior (20-18 Ma) y la franja de intrusivos del Mioceno superior (Farías, et al., 2008).

A partir del Mioceno tardío-Plioceno temprano se inicia la configuración actual del relieve característico que en el presente se puede observar, junto con la incisión causada por los ríos (Charrier, et al., 2009), generando los distintos tipos de depósitos no consolidados como consecuencia de procesos fluviales, aluviales y coluviales y que se encuentran cubriendo a las rocas más antiguas (FIGURA N° 2-9).

En el área se reconocen fallas antiguas, sin movimientos actuales y cuyos últimos movimientos ocurrieron durante el Mesozoico. Por su parte, la falla activa más cercana corresponde a la falla San Ramón, ubicada 20 km al poniente del área de análisis (SERNAGEOMIN, 2003; PMA-GCA, 2008).

A continuación, se describe la Formación Farellones, que corresponde a la única unidad geológica identificada en el contexto regional, y que además forman parte del área de análisis definida para este trabajo.

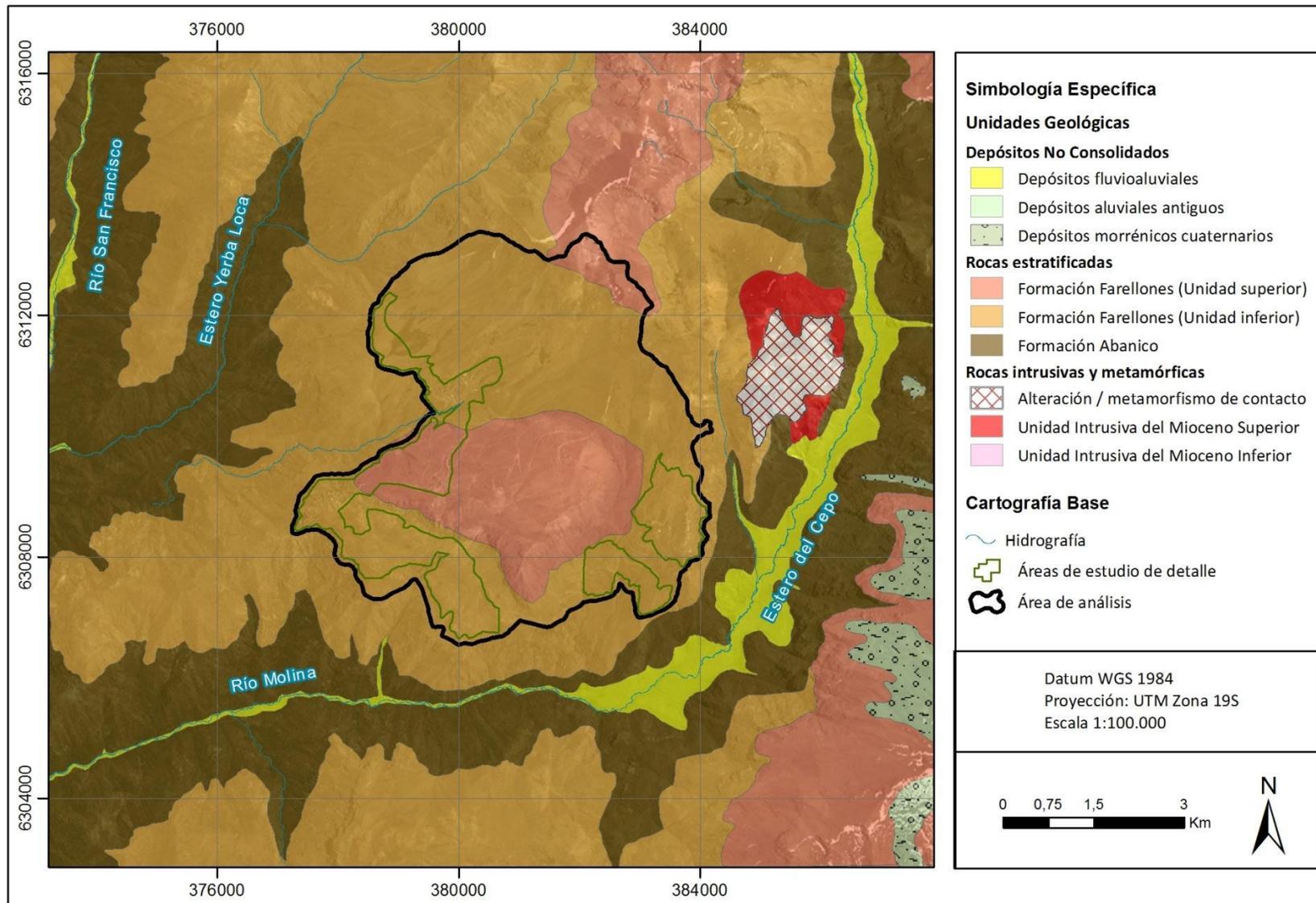
2.3.3.1.1 Formación Farellones

Fue definida por Klohn (1960), y corresponde a una sucesión de lavas, tobas e ignimbritas con intercalaciones de brechas volcánicas, depositadas durante el Mioceno, en la que existe un predominio de lavas frente a las tobas y brechas (Thiele, 1980). Si bien la Formación Farellones aflora extensamente en el contexto regional del país, para el área de análisis de este estudio y sus alrededores, Quiroga (2013) la describe como una unidad de tobas grisáceas y verdosas, con intercalación de niveles predominantemente líticos, entre niveles cristalinos, y con menor presencia de niveles conglomerádicos, que localmente se dispone de manera pseudoconcordante a discordante

sobre la Formación Abanico. Además, propone una subdivisión de la Formación Farellones, entre una Unidad Inferior y una Unidad Superior.

Según este autor, la Unidad Inferior está constituida predominantemente por tobas cristalinas y líticas, con brechas y en menor proporción conglomerados. Esta unidad forma gran parte del área de análisis de este estudio, siendo la excepción el Cerro Colorado y su proyección hacia el flanco occidental del mismo, sectores donde se observa la Unidad Superior (FIGURA N° 2-9). Por su parte, la Unidad Superior, que se dispone en discordancia sobre la Unidad Inferior, está compuesta por coladas riolíticas y dacíticas asociadas a la formación de domos, y andesitas basálticas, tobas, brechas, aglomerados volcánicos, tufitas y areniscas tobáceas (Carrasco, 2000; Quiroga, 2013).

FIGURA N° 2-9 Mapa geológico regional



Fuente: Elaboración propia basado en Quiroga (2013) y Rauld (2011).

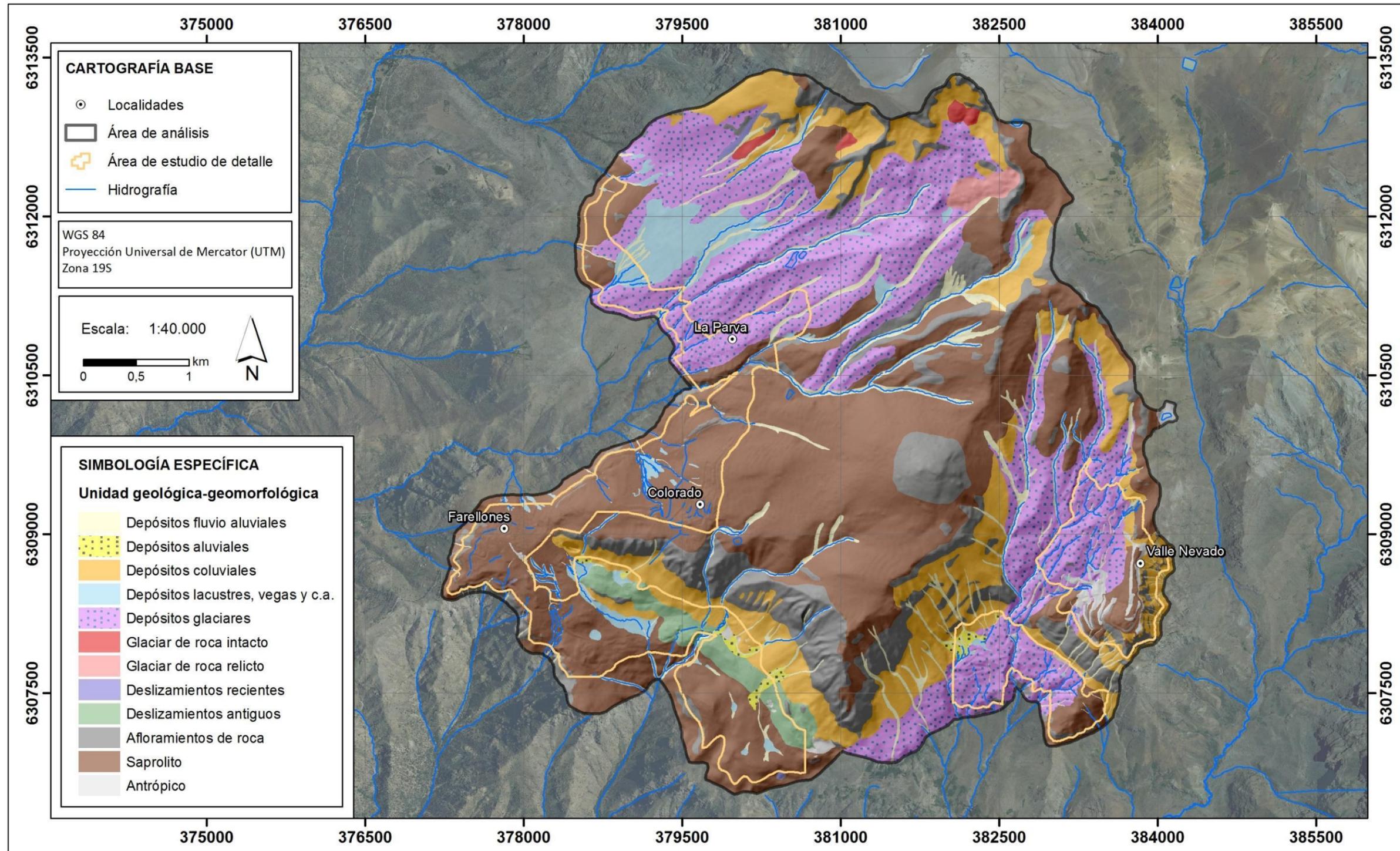
2.3.3.2 Marco geológico – geomorfológico local

Para el área de análisis, se elaboró un levantamiento geológico-geomorfológico, a partir del cual se identificaron los siguientes rasgos generales: la Formación Farellones tiende a presentarse como extensas superficies de roca meteorizada, de espesor variable de no más de 4 a 5 m máximo, en laderas con pendientes relativamente suaves ($< 25^\circ$), conformando lo que se ha definido en este estudio como “Saprolito”, y que muestra diferentes formas y grados de meteorización. La roca que aflora directamente en superficie, suele estar expuesta mediante escarpadas laderas, las que llegan a tener incluso pendientes de hasta 90° , a partir de las cuales el desmembramiento del material y posterior depósito genera coluvios en los pies de las mismas. En los sectores sur oriente y nor poniente del área de análisis (cuencas de las quebradas Honda y Manzanito respectivamente) se observan dos zonas con depósitos glaciares que descienden desde lo más alto de las cuencas aportantes, los cuales alcanzan hasta varias decenas de metros de espesor. Inmediatamente al este de Farellones, se observa una franja de dirección WWN-EES de 2,7 km, correspondiente a deslizamientos antiguos y profundos de gran escala (> 500 m de alcance). Por su parte, se identificaron una serie de deslizamientos recientes y superficiales de menores tamaños que los anteriores (en general, de decenas de metros de alcance). En superficie, se observa el trabajo de transporte y depósito asociado a la red de drenaje, que es la responsable de la incisión actual y de la formación de depósitos fluvio-aluviales, aluviales y lacustres. Asociados a los depósitos lacustres, los cuales suelen ubicarse en lugares donde la topografía genera depresiones, se observa el desarrollo de vegas debido al afloramiento de aguas subterráneas. Finalmente, y distribuidos en distintas zonas puntuales del área de análisis, se reconocen depósitos antrópicos, tales como terraplenes y extracción (movilización) de material no consolidado.

A continuación, se describen con más detalles las unidades geológicas-geomorfológicas identificadas, dándole especial énfasis a los depósitos no consolidados, puesto que estos constituyen un insumo fundamental para la posterior determinación de la susceptibilidad de peligros geológicos.

El mapa geológico-geomorfológico local del área de análisis se presenta dentro de este informe, solo a modo referencial, a escala 1:40.000 (FIGURA N° 2-10), y fuera de texto a escala 1:10.000 (Plano N°1). Los mapas geológico-geomorfológicos de las áreas de estudio de detalle, se presentan fuera de texto a escala 1:2.000 (Planos N°2 a N°7).

FIGURA Nº 2-10 Mapa geológico-geomorfológico local del área de análisis



Fuente: Elaboración propia.

2.3.3.2.1 Depósitos fluvio-aluviales (Qf)

Corresponden a sedimentos no consolidados, genéticamente relacionados con cursos fluviales activos, ya sean permanentes o esporádicos. Predominan las gravas clastosoportadas, polimícticas, compuestas por fragmentos de rocas de la Formación Farellones. Son clastos angulosos a sub redondeados, de baja esfericidad, y ocasionalmente se encuentran inmersos en una matriz arenosa (FIGURA N° 2-11).

Estos depósitos dependen del canal fluvial que les da origen, presentando anchos que varían entre los 3 y 50 m aprox., con espesores < 2 m. Cabe señalar que el espesor tiende a disminuir en la medida en que los canales son de mayores pendientes, hasta incluso desaparecer en aquellos lugares donde el curso de agua incide directamente la roca de la ladera. Se distribuyen de manera más o menos homogénea por toda el área de análisis.

FIGURA N° 2-11 Depósitos fluvio-aluviales en la salida de una obra de arte. Se observan gravas de hasta 25 cm de diámetros, clasto soportadas, con presencia local de matriz de arenas.



Fuente: Archivo fotográfico de terreno.

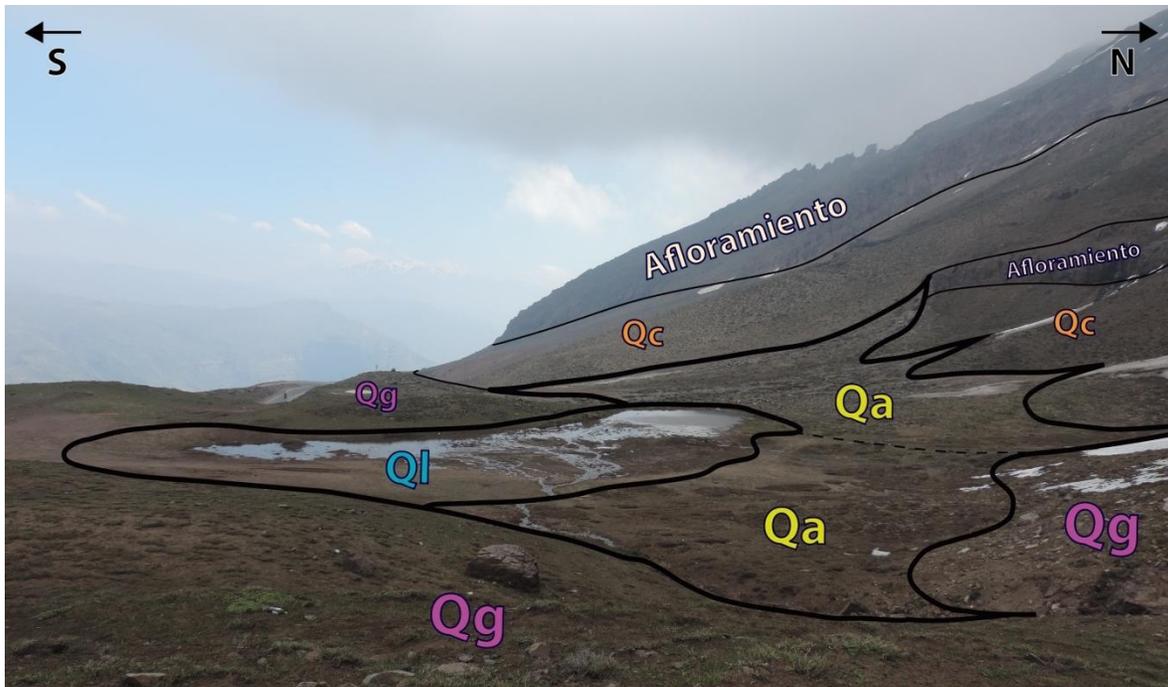
2.3.3.2.2 Depósitos aluviales (Qa)

Corresponden a sedimentos no consolidados ubicados en los pies de las laderas, que se encuentran adosados lateralmente a los depósitos fluvio aluviales, en lugares donde se observa una disminución importante en la pendiente curso fluvial. Suelen desarrollar morfologías de abanico, y están compuestos por depósitos con mala selección, de material grueso (< 0,5 m) inmerso en matriz fina, aunque en zonas distales a veces presentan únicamente material fino con buena selección, los cuales engranan con depósitos lacustres (FIGURA N° 2-12). Longitudinalmente, los abanicos asociados a estos depósitos varían entre los 50 y 650 m, mientras que transversalmente oscilan entre los 30 y 150 m.

Se interpretan como depósitos de flujos de detrito y/o barro esporádicos, que posteriormente han sido labrados por los cauces activos. Durante eventos meteorológicos extremos, estos depósitos tienden a recolectar los derrames de los cauces, una vez que el canal ve sobrepasado su capacidad de carga.

La distribución espacial de esta unidad se acota a 2 sectores particulares: una franja E-W en la cuenca de la quebrada Las Masas, al oriente y poniente de la misma; y al poniente de la quebrada Honda, lugar donde se observa la coalescencia de distintos abanicos aluviales (FIGURA N° 2-12). En ambos sectores se produce el mismo fenómeno: la desembocadura de canales de alta pendiente en zonas más bajas y llanas, lo que condiciona el derrame por causa de flujos de detritos y/o barro.

FIGURA N° 2-12 Depósitos aluviales en el camino entre Farellones y Valle Nevado. Se observa la coalescencia de abanicos aluviales, y el engrane con depósitos lacustres en las zonas distales de los abanicos.



Fuente: Archivo fotográfico de terreno.

2.3.3.2.3 Depósitos coluviales (Qc)

Corresponden a sedimentos no consolidados o pobremente consolidados, polimícticos, mal seleccionados, clastosoportados, ubicados en los pies de acantilados o laderas escarpadas, que tienden a formar morfologías cónicas, y que en algunos sectores pueden alcanzar varias decenas de metros de espesor (FIGURA N° 2-13). Están formados por clastos de un amplio rango de tamaños (desde milimétricos hasta decamétricos), con abundancia de bloques muy angulosos tamaño grava o mayores y escasa presencia de matriz intersticial de arenas. Los clastos representan la litología local, y los depósitos constituyen mantos adosados a las laderas (escombros de faldas), con pendientes > 10°, y desarrollo de estratificación gruesa paralela a la superficie sobre la cual se depositan (FIGURA N° 2-14).

Se interpretan como la acumulación de material producto del movimiento gravitacional de clastos que se desprenden del macizo rocoso, como parte del proceso erosivo del mismo.

Esta unidad aflora principalmente al norte del camino que une Farellones con Valle Nevado, también hacia el oriente de Valle Nevado, y en la cabecera de las cuencas del área de análisis.

FIGURA N° 2-13 Depósitos coluviales al costado norte del camino entre Farellones y Valle Nevado. Se observan las morfologías cónicas adosadas a las laderas escarpadas



Fuente: Archivo fotográfico de terreno.

FIGURA N° 2-14 Detalle de depósitos coluviales en calicata. Se observa la estratificación gruesa de los sedimentos, y bloques caídos de algunos metros de diámetro formando parte del depósito.



Fuente: Archivo fotográfico de terreno.

2.3.3.2.4 Depósitos lacustres, vegas y cuerpos de agua (QI)

Corresponden a sedimentos no consolidados, constituidos por arenas finas y limos, en algunos casos laminados, ubicados en zonas deprimidas, o en lugares donde la napa freática se encuentra a profundidades someras (o donde aflora permanentemente), formando lagunas o extensas zonas de pantanos (FIGURA N° 2-15). Debido a la abundante presencia de agua, suelen desarrollarse vegas, las cuales funcionan como un buen indicador adicional (además del bloqueo de la red de drenaje por efecto de la topografía) para determinar posibles zonas de anegamientos. Los depósitos que se ubican en zonas deprimidas suelen presentar grietas de desecación, lo que se interpreta como eventos de anegamientos esporádicos. En general, el espesor de esta unidad es de orden métrico, con excepción de la Vega de Manantiales (FIGURA N° 2-16), donde a pesar de no haber podido ser medido directamente, se estima un espesor de algunas decenas de metros.

Esta unidad se distribuye principalmente con ejemplares diseminados en ambos lados del camino que une Farellones con Valle Nevado, inmediatamente al norte de Farellones, al sur oriente del camino que une Farellones con El Colorado, y al norponiente de La Parva, lugar donde se ubica la Vega de Manantiales.

FIGURA N° 2-15 Depósitos lacustres en la Vega de Manantiales. Se observa el afloramiento de agua subterránea y el anegamiento en superficie.



Fuente: Archivo fotográfico de terreno.

FIGURA N° 2-16 Vista panorámica de la Vega de Manantiales. Se observa limitada lateralmente por dos lóbulos convexos y alargados de depósitos glaciares, y La Parva de fondo.



Fuente: Archivo fotográfico de terreno.

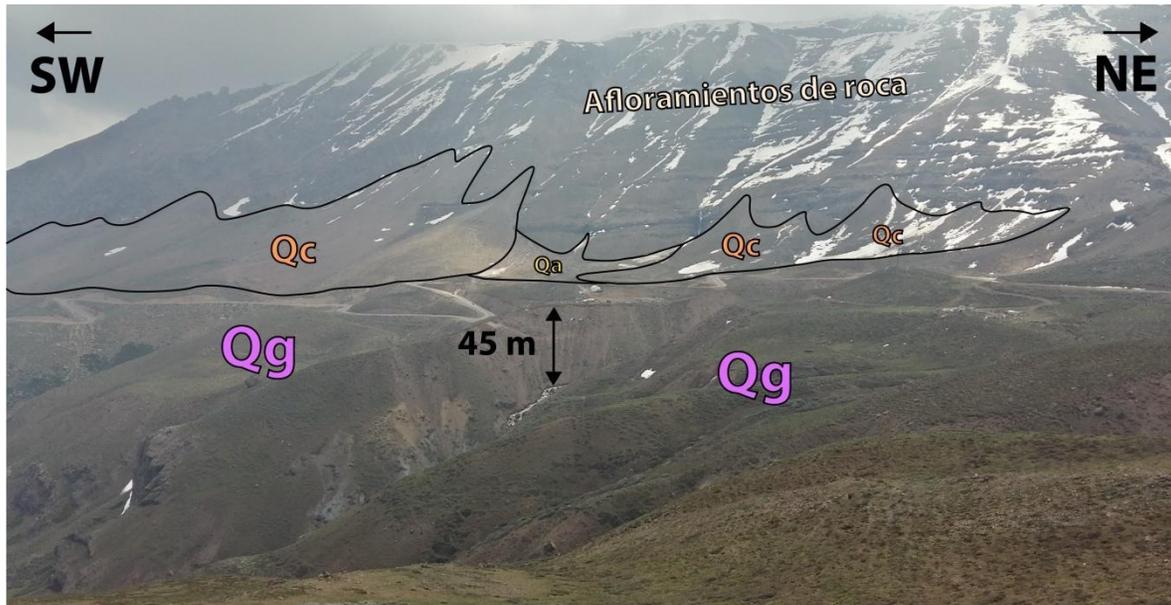
2.3.3.2.5 Depósitos glaciares (Qg)

Corresponden a sedimentos no consolidados, polimícticos, mal seleccionados, compuestos de bloques angulares de hasta algunos metros de diámetro, generalmente aislados e inmersos en una matriz fina de arenas y limos, aunque localmente también presenta zonas de bloques clastosoportados (FIGURA N° 2-17). Morfológicamente, los depósitos muestran una topografía fuertemente irregular (tipo hummocky, FIGURA N° 2-18), así como también lóbulos alargados longitudinalmente y convexos (FIGURA N° 2-16). El espesor del depósito es variable, alcanzando el orden de las decenas de metros (FIGURA N° 2-18), el cual disminuye en la medida en que se adosa en las laderas laterales.

Se interpretan como la acumulación de material producto del avance glacial, el cual desmembra clastos de roca fresca de las laderas de los cerros, así como también retrabaja y removiliza material no consolidado previamente depositado, para formar un producto sedimentario caótico.

Se distribuyen como franjas que descienden desde las nacientes de las 2 cuencas mayores del área de análisis: la cuenca de la quebrada Honda, en el sector de Valle Nevado, y la cuenca del estero Manzanito, lugar donde el depósito glacial es sobreyacido por los depósitos lacustres de la Vega de Manantiales (FIGURA N° 2-16).

FIGURA N° 2-17 Depósitos glaciares en ambos costados de la quebrada Honda. Se observa una superficie fuertemente irregular (tipo hummocky), y al menos 45 m de espesor del depósito.



Fuente: Archivo fotográfico de terreno.

FIGURA N° 2-18 Detalle de los depósitos glaciares en ambos costados de la quebrada Honda. Se observan un depósitos mal seleccionados con bloques de hasta 1,5 m de diámetro.



Fuente: Archivo fotográfico de terreno.

2.3.3.2.6 Glaciares de roca (activos / intactos / relictos / intactos(?))⁴

Los glaciares, en general, pueden presentar una variada cantidad de “impurezas”, compuestas principalmente de material detrítico desprendido de las laderas circundantes (desde grandes bloques hasta partículas tamaño arcilla). Los glaciares que contienen un porcentaje de detrito que cubre toda su Zona de Ablación (áreas del glaciar de menor cota, donde el balance anual de material es negativo) y parte importante de su Zona de Acumulación (áreas del glaciar de mayor cota, donde el balance anual de material es positivo) se denominan “glaciares de roca” (Geoestudios, 2008).

En promedio, entre un 40 – 60% del volumen de un glaciar de roca está compuesto por hielo. Adicionalmente, la capa de detritos superficial, así como la base en sub-superficie del glaciar, constituyen acuíferos temporales. Por estas características, los glaciares de roca son considerados también como importantes reservorios de agua (Brenning, 2005).

Cuando los glaciares de roca avanzan ladera abajo (*creeping*), se les denomina “glaciares de roca activos”. Tienden a desarrollar morfologías lobulares alargadas en la dirección del movimiento, un escarpe frontal y surcos (arrugas) en superficie. Aquellos glaciares de roca que han detenido su movimiento ladera abajo, pero que todavía contienen hielo, se les denomina “inactivos”. Ambos tipos de glaciares (activos e inactivos) se agrupan en la categoría de “intactos”. Por su parte, el depósito detrítico que se mantiene una vez que el glaciar de roca ha perdido el hielo por efecto del derretimiento, se denomina “glaciar de roca relicto” (Brenning, 2005).

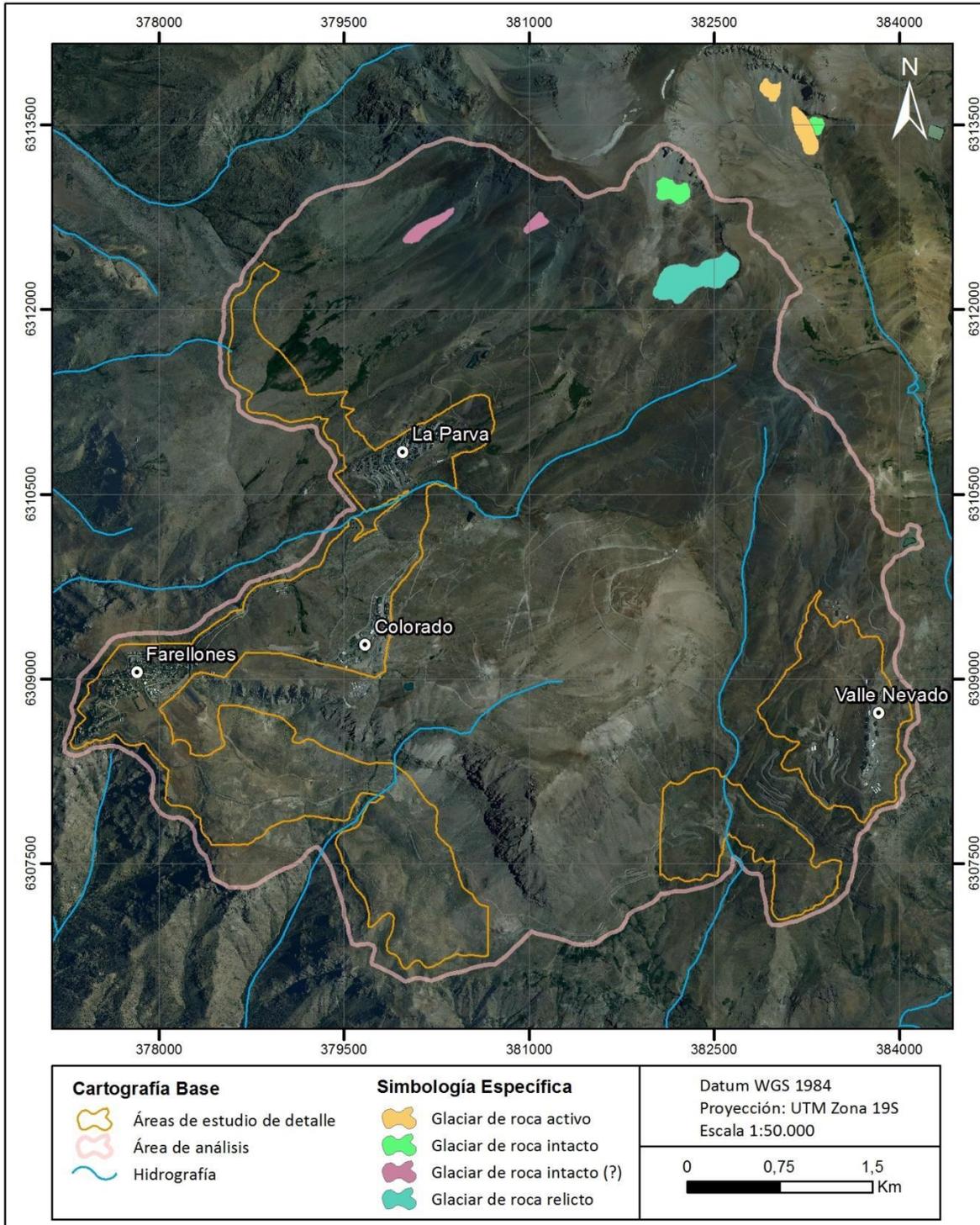
Para el caso de estudio, y mediante imágenes satelitales, fueron identificados 3 glaciares de roca intactos y 1 glaciar de roca relicto, ubicados en el sector norte del área de análisis, específicamente en las cabeceras de las cuencas. Estos glaciares presentan morfologías lobulares alargadas, superficies irregulares surcadas (arrugas) constituidas por bloques de distintos tamaños, que alcanzan hasta los 5 m de diámetro aprox. El largo de los glaciares varía entre los 200 y 750 m, mientras que el ancho entre los 100 y 300 m. Todos se ubican sobre la cota de los 3000 m.s.n.m., y no superan los 3600 m.s.n.m.

En las cuencas aledañas al área de análisis, y en general en cotas superiores, se observan ejemplares de glaciares de roca con un mejor desarrollo morfológico (más extensos, con el escarpe frontal bien delimitado y superficies fuertemente rugosas). Es importante señalar que de los 4 ejemplares identificados dentro del área de análisis, existen 2 cuyas características morfológicas se encuentran suavizadas por procesos naturales, las que no permiten declararlo como glaciar de roca con total certidumbre, y para cuya clasificación certera hacen falta estudios específicos. En el catastro, estos 2 ejemplares fueron declarados con un signo de interrogación al final (“glaciar de roca intacto (?)”, con signo de interrogación debido a la ausencia de estudios específicos que permita declarar técnicamente dicha afirmación”, ver FIGURA N° 2-19).

La identificación de los glaciares de roca fue corroborada mediante comunicación personal con expertos en el tema (Guillermo Azócar, Alexander Brenning), quienes han realizado estudios en la alta Cordillera de Chile Central, y cuyas zonas de análisis contemplan la del presente informe, aunque a diferentes escalas de trabajo (e.g. Brenning & Azócar (2010), Azócar & Brenning (2009), Brenning (2005).

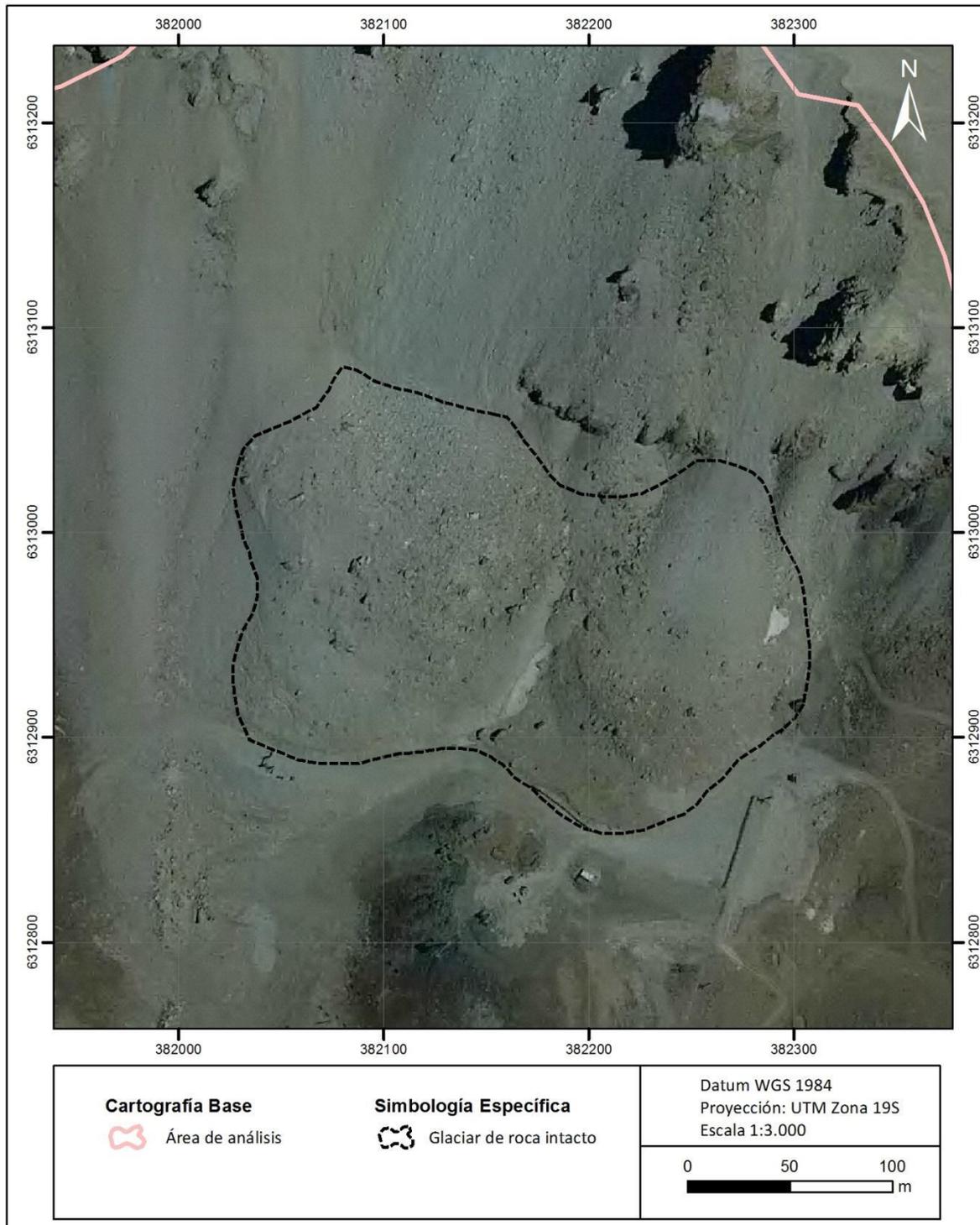
⁴ La denominación intacto (?) se refiere a que no hay certeza que los glaciares de roca observados están realmente en ese estado debido a la ausencia de estudios específicos que lo corrobore o desmienta.

FIGURA N° 2-19 Ubicación de los glaciares de roca identificados dentro del área de análisis, y en las zonas inmediatamente aledañas. Se reconocen glaciares de roca activos, intactos, relictos e “intactos (?)” (ver pie de figura).



Fuente: Elaboración propia. Los “glaciares de roca intactos (?)” corresponden a posibles ejemplares de los mismos, pero cuyas características morfológicas se encuentran suavizadas, por lo que no se consideró adecuado clasificarlos como glaciares de roca con total certidumbre. Tal designación requiere de estudios específicos, con mayor detalle de análisis.

FIGURA N° 2-20 Acercamiento al glaciar de roca intacto identificado dentro del área de análisis.



Fuente: Elaboración propia.

2.3.3.2.7 Deslizamientos recientes

Corresponden a sedimentos no consolidados, acumulados debido al movimiento de material (ya sea roca o regolito) ladera abajo, que se produce a lo largo de una superficie de ruptura o de deslizamiento. Las características texturales del depósito dependen del material original que fue movilizado, en el sentido de que este material tiende a desintegrarse y desagregarse en la medida en que se moviliza ladera abajo. Generalmente los depósitos están formados de bloques angulosos, con mayor o menor porcentaje de matriz, dependiendo del caso.

En varios ejemplares, el depósito del deslizamiento ya no está presente, debido a que el material fue removilizado, siendo que aún es posible identificar la zona de arranque del mismo (superficie de ruptura o cicatriz, FIGURA N° 2-74). En estos casos, se delimitó únicamente la superficie de ruptura como un escarpe, sin marcar ningún depósito asociado a este.

El alcance (*run out*) de los deslizamientos recientes varía entre las decenas de metros (la gran mayoría) hasta algunas centenas de metros (solo en casos excepcionales).

En términos de la distribución espacial, se observa una acumulación importante de estos eventos al sur de Valle Nevado, afectando la unidad de depósitos glaciares, y al oriente de la quebrada Las Masas, donde se observan extensas cicatrices de deslizamientos, y cuyos depósitos se encuentran actualmente cubiertos por material coluvial.

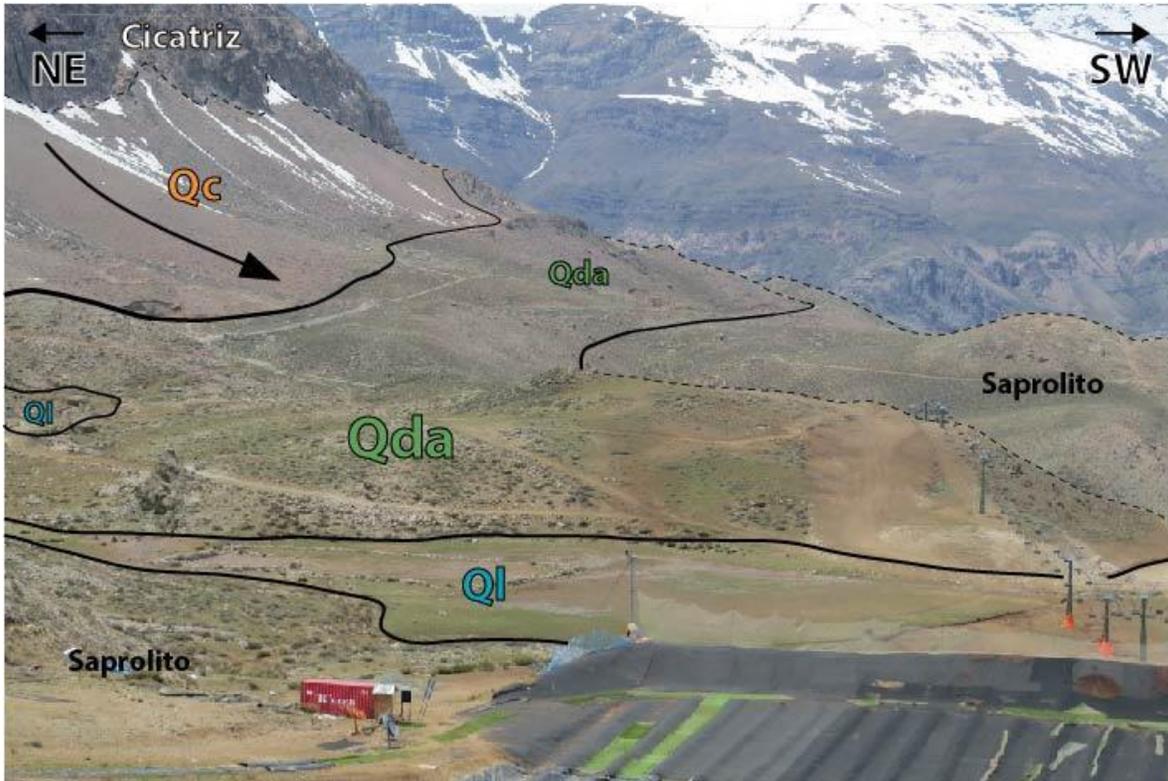
2.3.3.2.8 Deslizamientos antiguos (Qda)

Este depósito se observa como una franja continua de dirección WNW / EES, de 2,7 km de largo, con un ancho variable entre 100 y 700 m. Esta franja está compuesta por una serie de deslizamientos de gran escala (es decir, no corresponde al depósito de un único evento), que presenta superficialmente una topografía muy irregular tipo *hummocky* (FIGURA N° 2-21). En el extremo occidental de la franja, se observa un bajo topográfico que actualmente se encuentra siendo rellenado con depósitos lacustres, aluviales y coluviales. Este bajo topográfico se interpreta como producto del mismo desencadenamiento de alguno de los deslizamientos (FIGURA N° 2-22).

Texturalmente, corresponden a sedimentos no consolidados compuestos por mega bloques que pueden alcanzar las centenas de metros, inmersos en una matriz de clastos más pequeños, los que van desde bloques de algunos pocos metros hasta arena fina, constituyendo un depósito de muy mala selección. Los bloques mayores usualmente no afloran en superficie, debido a que se encuentran cubiertos por material más fino; algunos de ellos encuentran altamente fragmentados, debido al extenso movimiento (entre 500 y 800 m de *run out*) y a los esfuerzos diferenciales a los que probablemente estuvieron sometidos durante su desplazamiento (FIGURA N° 2-23)

Las superficies de ruptura expuestas corresponden a los escarpes abruptos (acantilados) que llegan a ser incluso verticales, y que se ubican inmediatamente al norte del depósito. A partir de estos escarpes se observa un desprendimiento activo de material, el cual cae gravitacionalmente provocando que a los pies de los mismos se desarrolle un relleno coluvial (ver sección ANEXO E "Depósitos coluviales"). A escala de tiempo geológico, este relleno va colmatando gradualmente el espacio que existe entre el escarpe y el depósito del deslizamiento (FIGURA N° 2-22). En comparación con los deslizamientos recientes, las dimensiones del depósito (que en algunos sectores alcanza varias decenas de metros de espesor) permiten inferir que la superficie de ruptura es profunda, mientras que a partir del importante desarrollo de conos coluviales, se desprende que son más antiguos.

FIGURA N° 2-21 Vista panorámica del depósito de deslizamientos antiguos. Se observa la gran extensión del depósito (2,7 km) y la topografía superficial tipo hummocky. La flecha negra indica la dirección de movimiento.



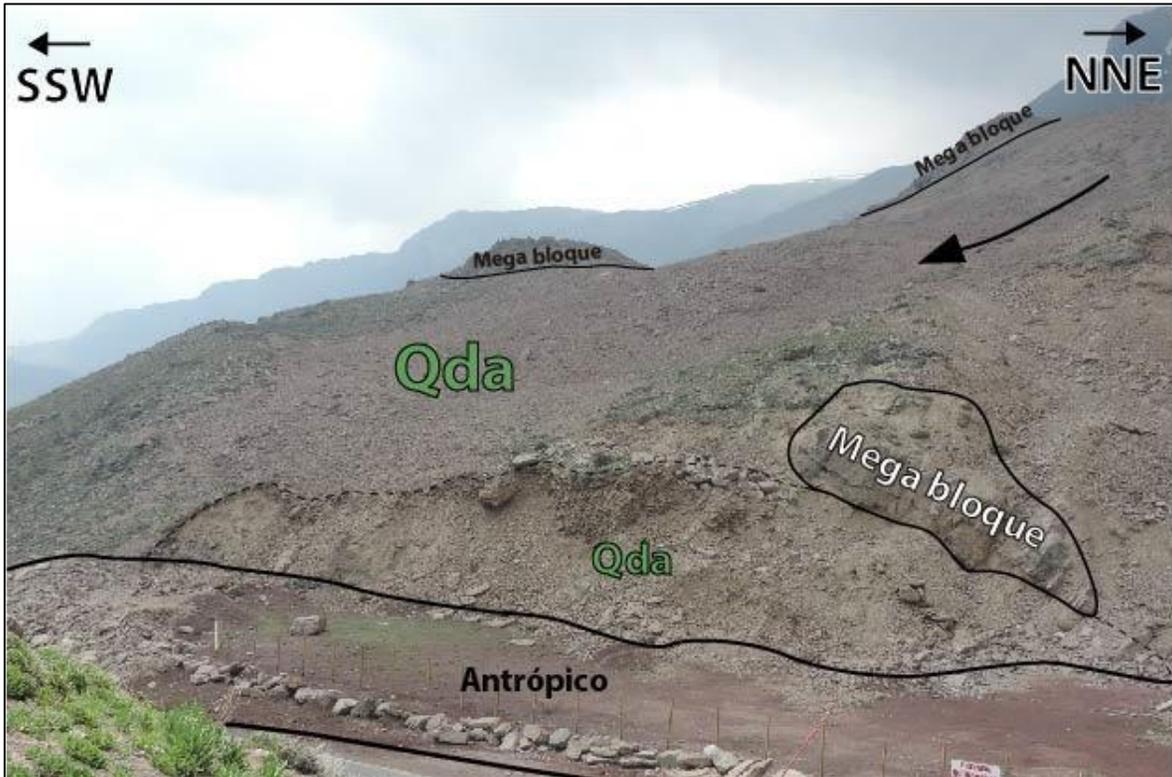
Fuente: Archivo fotográfico de terreno.

FIGURA N° 2-22 Depresión topográfica entre el depósito y la superficie de ruptura (cicatriz del fondo). Se observan los depósitos lacustres (con un cuerpo de agua) y aluviales en la depresión, así como el relleno coluvial adosado al acantilado.



Fuente: Archivo fotográfico de terreno.

FIGURA N° 2-23 Vista del extremo oriental del depósito. Se aprecian los mega bloques (los superiores alcanzan más de 100 m de extensión), inmersos en una matriz de bloques menores.



Fuente: Archivo fotográfico de terreno.

2.3.3.2.9 Afloramientos de roca

Corresponden a macizos rocosos que se encuentran expuestos en superficie, sin una cobertura de regolito, o donde la cobertura de regolito es prácticamente inexistente. La litología corresponde a la Formación Farellones (unidades Superior e Inferior), descrita en la sección 2.3.3.1.1. En general, la roca aflora en laderas con pendientes muy altas (escarpes que incluso llegan a ser verticales), y suele mantener sus características geomecánicas bien preservadas. Sin embargo, en sectores puntuales, como por ejemplo en la cumbre del Cerro Colorado, la roca fresca se encuentra cubierta por una delgada capa de fragmentos de roca lajada, de la misma litología, producida *in-situ* por procesos de meteorización. Los afloramientos de roca se consideran como semilleros de material que eventualmente podría convertirse en caída de bloques ladera abajo.

Esta unidad se distribuye principalmente en 3 sectores: en el costado norte del camino que une Farellones con Valle Nevado, en la cumbre del Cerro Colorado, y hacia las cabeceras de las cuencas del sector norte del área de análisis.

2.3.3.2.10 Sapolito

En general, el sapolito se define como el material producido *in-situ* por procesos de meteorización, que mantiene la fábrica y estructura de la roca parental, y que presenta una desarrollada meteorización inter e intracristal (Schaetzl & Anderson, 2005). Conceptualmente, se ubica por debajo de los horizontes de suelo A y B, y por sobre la roca parental inalterada (Selby, 1993). Sin embargo, en la

práctica el horizonte de suelo podría no estar presente, y el grado de meteorización de la roca puede ser muy variable, así como también su espesor.

Para el caso, las litologías que componen el saprolito corresponden a los miembros superior e inferior de la Formación Farellones (ver sección 2.3.3.1) dependiendo de cuál es la roca parental que está siendo meteorizada, mientras que el espesor en todos los sectores estudiados no supera el orden de los 4 - 5 m.

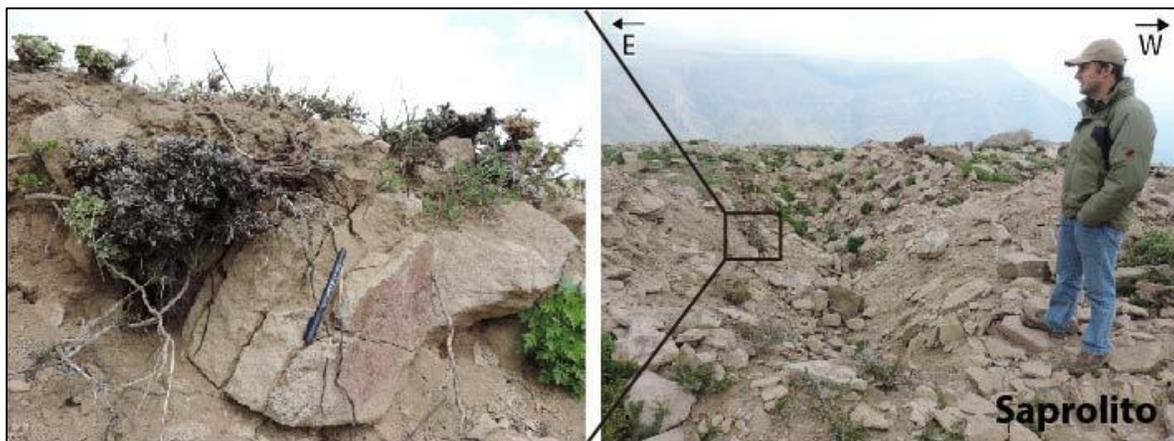
Esta unidad se distribuye ampliamente por el área de análisis, en general formando parte de laderas de pendientes relativamente suaves ($<25^\circ$), y presentando una fuerte variación de sus características texturales. Sin embargo, se pueden mencionar 2 sectores puntuales a modo de miembros extremos, entre medio de los cuales el resto de los sectores expresa texturas intermedias: por un lado, el sector de Farellones, donde se observa una cobertura de hasta 4 a 5 m de espesor, en que el material se presenta fuertemente meteorizado, hay importante desarrollo de horizontes de suelo, abundantes minerales de arcillas y material disgregado tamaño limo, y donde la fábrica original de la roca, a pesar de presentarse muy desintegrada, se logra distinguir en los cortes de camino (FIGURA N° 2-24); por otro lado, en el camino entre Farellones y Valle Nevado, específicamente dentro de la cuenca de la quebrada Las Masas, el saprolito corresponde a una cobertura < 3 m de material fragmentado, que forma bloques angulosos de hasta 30 cm de diámetro, prácticamente inalterados, con abundante desarrollo de fracturas en las que intersticialmente se observa un suelo arcilloso de volumen menor, con importante intercrecimiento de raíces, las que en el largo plazo acentúan los procesos de meteorización de la roca (FIGURA N° 2-25). La topografía en este último sector es fuertemente irregular (tipo *hummocky*), lo que incluso da origen a depósitos lacustres en los bajos topográficos. El resto de los sectores del área de análisis que presenta saprolito, muestra una variación textural que oscila dentro de estos 2 miembros extremos, y cuya especificación se escapa de los objetivos del presente estudio (se da un ejemplo en la FIGURA N° 2-26). Dichos sectores corresponden al flanco occidental del Cerro Colorado y su proyección hacia el poniente, las partes altas de la zona norte del área de análisis, las partes altas del sector de Valle Nevado, el extremo sur oriental de la zona de análisis y el sector ubicado inmediatamente al norponiente de la Vega de Manantiales.

FIGURA N° 2-24 Sapolito en el sector de Farellones. Se observa una cobertura de alrededor de 5 m de espesor, de roca fuertemente meteorizada, sobre afloramientos de roca fresca.



Fuente: Archivo fotográfico de terreno.

FIGURA N° 2-25 Sapolito en la cuenca de la quebrada Honda. Se observa una cobertura de roca meteorizada en forma de bloques angulosos, en los que intersticialmente hay desarrollo de suelo y raíces.



Fuente: Archivo fotográfico de terreno.

FIGURA N° 2-26 Saprolito en el corte de un cerrillo en el camino entre Farellones y Valle Nevado. Se observa una cobertura de roca parcialmente meteorizada, en la que es posible identificar la fábrica y estructura de la roca parental.



Fuente: Archivo fotográfico de terreno.

2.3.3.2.11 Depósitos antrópicos

Corresponde a sectores donde se observa la (re)mobilización y depósito de material por efectos antrópicos. Es común la presencia de terraplenes (< 4 m de altura) y sectores donde se ha extraído material para uso industrial o de construcción.

2.3.4 Marco hidrológico

2.3.4.1 Revisión de antecedentes

2.3.4.1.1 Antecedentes publicaciones anteriores

ANEXO A Proyecto Embalse Las Bayas Valle Nevado (Martinez y Cuevas Ingenieros Consultores, 1998)

Este proyecto fue presentado por Valle Nevado S.A. en 1994 a la Dirección General de Aguas para la autorización a la construcción del Embalse Las Bayas, cuya finalidad es la acumulación de aguas de los deshielos para consumos del Centro Invernal Valle Nevado.

Este embalse fue construido con anterioridad a la vigencia de la Ley 19.300 de Bases del Medio Ambiente. Su capacidad es de 45.000 m³, para lo que se dispuso una presa de tierra de 20 m de altura. Su ubicación se encuentra a 2.500 m en línea recta al norte del centro invernal, cerca de la confluencia de los esteros Bayas Oriente y Bayas Poniente, a una cota de 3.200 m.s.n.m. y está conformado por una quebrada de fondo rocoso.

Debido a que el área de estudio es una pequeña cuenca no controlada, se optó por realizar el cálculo por métodos indirectos, basados en tasas de derretimiento máximo utilizando la metodología propuesta en el documento "Procedimiento para la estimación de Crecidas en Cuencas Nivales", H Peña et al., VII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica, 1985.

Utilizando esta metodología se determinó un derretimiento máximo de 51 mm/día, que permite calcular el máximo caudal probable para el diseño del vertedero del embalse.

Por otro lado, se estimó el gasto sólido de fondo para la granulometría completa mediante el método de Meyer, Peter y Muller utilizando la curva granulométrica determinada en esa ocasión para el lecho del Río Olivares.

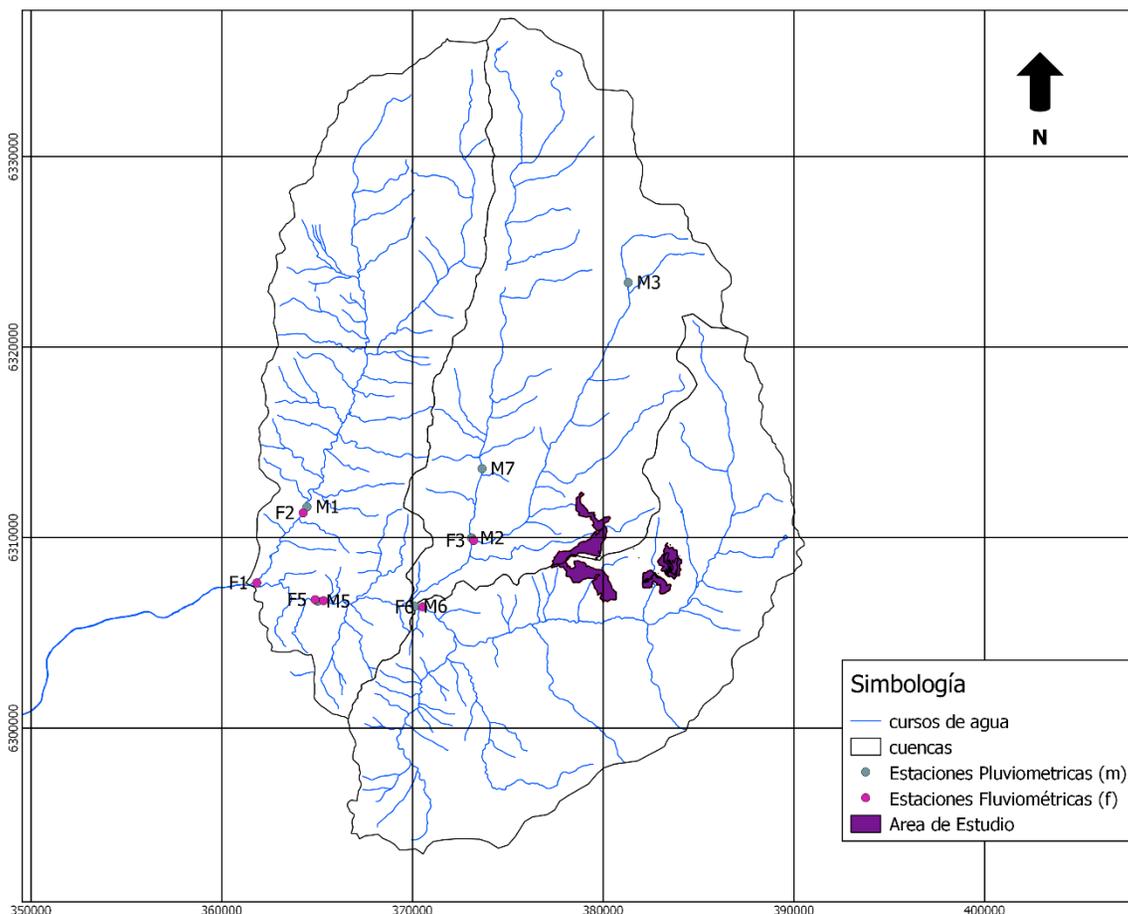
ANEXO B Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias del Gran Santiago (DOH, 2001)

Este estudio incluye en su área de estudio las zonas urbanas consolidadas y de expansión determinadas en el Plan Regulador Metropolitano de Santiago (PRMS 1994) y en los Planes Reguladores de las comunas que forman parte del PRMS. La información generada responde a esta área, incluyendo el área de estudio del presente proyecto como parte de la cuenca aportante, sin estudiarla en detalle. Los estudios se refieren a crecidas pluviales, que son las relevantes para el área de estudio del Plan Maestro. Las estaciones fluviométricas y pluviométricas se ubican aguas abajo de la zona a estudiar en este estudio.

2.3.4.1.2 Información Hidrometeorológica

Se recopiló la información proveniente de la Red Hidrométrica Nacional correspondiente a estaciones disponibles en las cuencas cercanas al área en estudio. Estas son: Río Molina, Río San Francisco y Río Mapocho Entre Río San Francisco y Bajo Junta Estero Arrayán. En la FIGURA N° 2-27 se presenta la distribución espacial de las estaciones disponibles y en el CUADRO N° 2-2 y CUADRO N° 2-3 se incluye la información general de las estaciones meteorológicas y fluviométricas respectivamente.

FIGURA N° 2-27 Estaciones hidrometeorológicas cercanas al área de estudio



Fuente: Elaboración propia

CUADRO N° 2-2 Estaciones Meteorológicas

Num	COD_BNA	Nombre	UTM Norte	UTM Este	Altitud (m.s.n.m.)	Fecha Inicio	Fecha Suspensión
M1	057220 01-5	Estero Arrayán en La Montosa	6311618	364466	880	01-08-1980	No Suspendida
M2	057210 01-K	Estero Yerba Loca antes junta San Francisco	6309978	373099	1350	01-09-1974	No Suspendida
M3	057210 17-6	Estero Yerba Loca en Piedra Carvajal	6323390	381313	3250	21-04-2011	No Suspendida
M4	057200 03-0	La Ermita Central en Bocatoma	6309978	373099	1350	01-04-1987	11-04-2014
M5	057220 02-3	Río Mapocho en Los Almendros	6306665	365026	966	01-01-1986	No Suspendida
M6	057200 01-4	Río Molina antes junta San Francisco	6306396	370122	1158	01-09-1974	No Suspendida
M7	057210 16-8	Río San Francisco antes junta estero Yerba Loca	6313621	373646	1550	31-12-2004	No Suspendida

Fuente: SNIA, DGA

CUADRO N° 2-3 Estaciones Fluviométricas

Num	COD_BNA	Nombre	UTM Norte	UTM Este	Altitud (m.s.n.m.)	Fecha Inicio	Fecha Suspensión
F1	057220 06-6	Estero Arrayán en Desembocadura	6307629	361833	870	01-01-1968	28-01-2003
F2	057220 01-5	Estero Arrayán en La Montosa	6311298	364264	880	01-08-1980	No Suspendida
F3	057210 01-K	Estero Yerba Loca antes junta San Francisco	6309848	373205	1300	01-09-1974	No Suspendida
F4	057220 02-3	Río Mapocho en Los Almendros	6306686	365333	990	01-01-1986	No Suspendida
F5	057220 04-K	Río Mapocho en Puente Nilhue	6306748	364896	-99	01-12-1928	01-05-1942
F6	057200 01-4	Río Molina antes junta San Francisco	6306363	370537	1150	01-09-1974	01-07-1987
F7	057210 16-8	Río San Francisco antes junta estero Yerba Loca	6313621	373646	1550	31-12-2004	No Suspendida

Fuente: SNIA, DGA

Las características de cada una de estas quebradas se presentan en el siguiente cuadro:

CUADRO N° 2-4 Característica de principales cuencas aportantes

Cuenca	Área (km ²)	Altura media (m.s.n.m.)	Pendiente media (°)	Largo cauce (m)
Estero Manzanito o Barros Negros	16,80	2864,84	16,71	7,23
Quebrada Honda	6,65	2565,49	20,08	5,32
Quebrada Las Masas	8,84	2851,09	19,69	3,54

Fuente: Elaboración propia

Cada una de estas cuencas contiene una serie de quebradas que serán evaluadas individualmente como parte del estudio hidráulico.

2.3.4.3 Estudio de crecidas

La zona en estudio se encuentra emplazada en cuencas nivales. Debido a la existencia de información fluviométrica, la determinación de caudales de crecida en las quebradas que cruzan el área de estudio se realizará a partir un análisis estadístico a partir de datos fluviométricos de estaciones cercanas y luego se aplicará transposición de áreas.

2.3.4.3.1 Información Fluviométrica

Como se describió en el acápite 3.2, existen 7 estaciones fluviométricas en cuencas vecinas. Un resumen de la información disponible se presenta en el CUADRO N° 2-5. Tanto las estaciones Estero Arrayán en Desembocadura como Río Mapocho en Puente Nilhue no presentan información disponible en el sistema web del SNIA.

CUADRO N° 2-5 Información disponible de caudales instantáneos en estaciones fluviométricas

Nombre Estación	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Estero Arrayán en Desembocadura																														
Estero Arrayán en La Montosa	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	5
Estero Yerba Loca antes junta San Francisco	2	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	
Río Mapocho en Los Almendros	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	5
Río Mapocho en Puente Nilhue																														
Río Molina antes junta San Francisco																								6	11	12	12	11	12	4
Río San Francisco antes junta estero Yerba Loca																								2	4	12	12	10	12	3

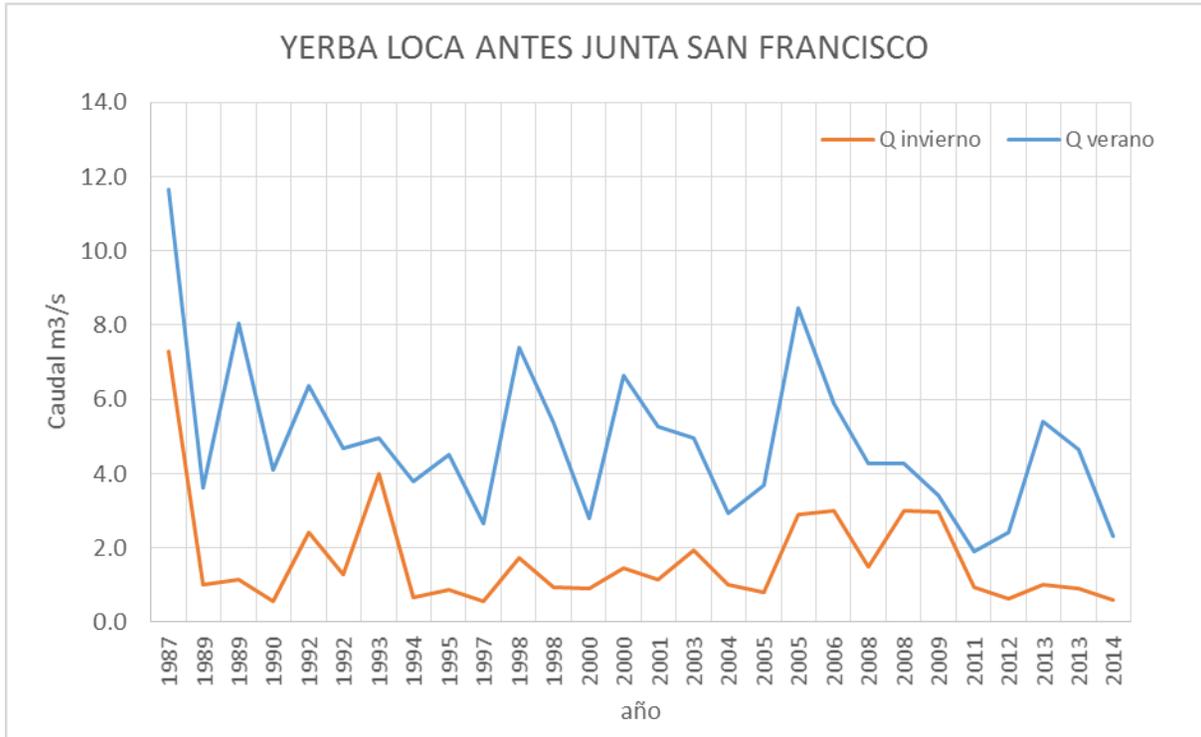
- Años con información completa
- Años con 9 a 11 meses de información
- Años con 5 a 8 meses de información
- Años con menos de 5 meses de información
- Años sin información

Fuente: SNIA, DGA

En esta tabla se aprecia que sólo la estación Estero Yerba Loca antes de junta San Francisco dispone de series de datos suficientemente extensas como para realizar un ajuste de frecuencia. Lo mismo ocurre con las estaciones Río Mapocho en Los Almendros y Estero Arrayán en La Montosa. Sin embargo ambas estaciones son más lejanas al área de estudio.

El estero Yerba Loca pertenece a la cuenca del río San Francisco y tiene un área drenante de 110 km². Su régimen es nival. Se extrajo las series de caudales máximos anuales separados estacionalmente en invierno y verano (considerando los meses 9-3), los que se grafican en la FIGURA N° 2-29.

FIGURA N° 2-29 Caudales máximos anuales de invierno y verano

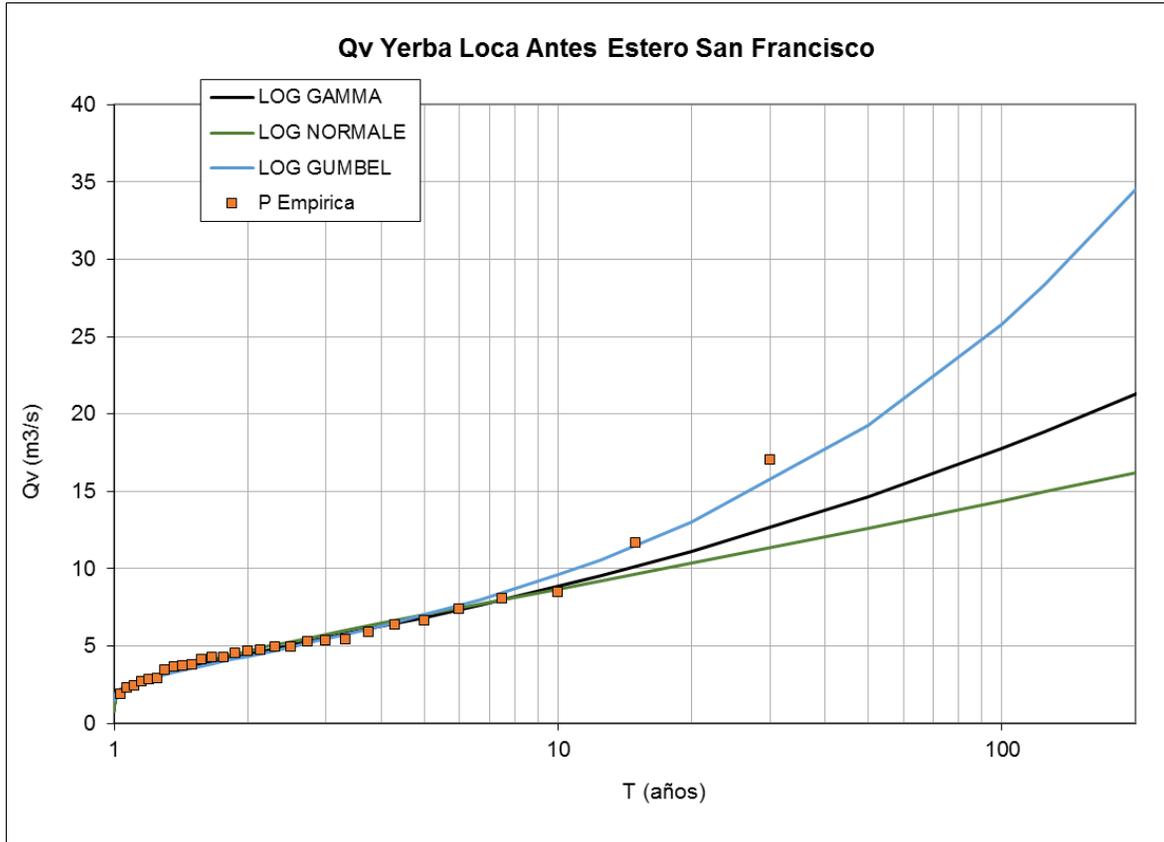


Fuente: Elaboración propia en base a antecedentes SNIA, DGA

2.3.4.3.2 Ajuste de Frecuencias

Se realizó un ajuste de distribución de frecuencias a los datos de la serie de caudales máximos de verano, seleccionando como distribuciones de mejor ajuste las siguientes: Log Normal, Log Gamma y Log Gumbel. En la FIGURA N° 2-30 se representa gráficamente las tres funciones de distribución seleccionadas y en el CUADRO N° 2-6 se incluye los valores obtenidos para los test de ajuste.

FIGURA N° 2-30 Ajuste de distribuciones de frecuencia de caudales máximos de verano Estero Yerba Loca



Fuente: Elaboración propia en base a antecedentes SNIA, DGA

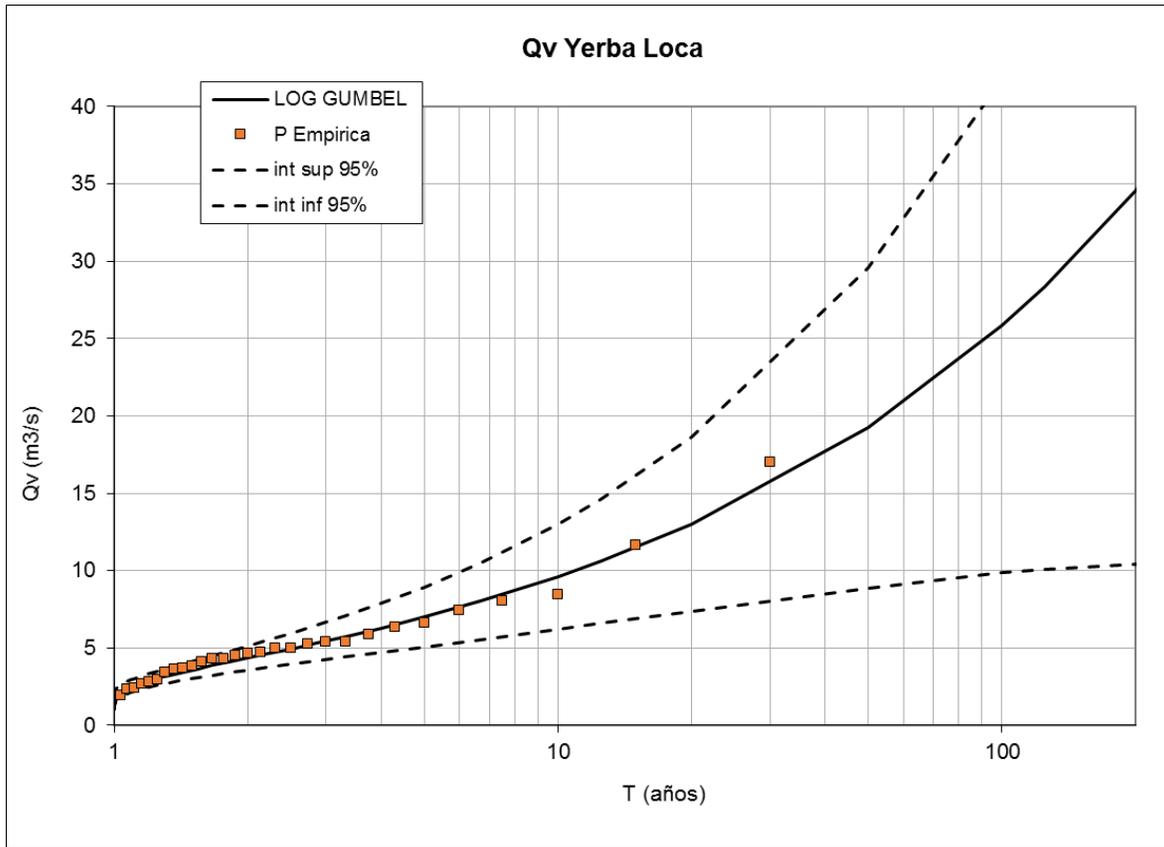
CUADRO N° 2-6 Test de ajuste de frecuencia

Distribución	Test Chi 2	Grados de libertad	Ajuste
Log Normal	1,17	2	Aprobado
Log Gama	1,52	2	Aprobado
Log Gumbel	1,52	3	Aprobado

Fuente: Elaboración propia en base a antecedentes SNIA, DGA

Si bien las tres distribuciones de frecuencia se ajustan adecuadamente a la serie de caudales de verano analizados, los valores más altos se ajustan de mejor manera a la distribución Log Gumbel, la que será adoptada para favorecer el ajuste de caudales mayores. En la FIGURA N° 2-31 se presenta el ajuste seleccionado para la serie de caudales disponible incluyendo el intervalo de confianza de 95%.

FIGURA N° 2-31 Ajuste de distribución de frecuencia seleccionado con intervalo de confianza de 95%



Fuente: Elaboración propia en base a antecedentes SNIA, DGA

CUADRO N° 2-7 Caudales de verano por período de retorno

T (años)	Qv (m³/s)	Qv 95% inf (m³/s)	Qv 95% sup (m³/s)
2	4,35	3,57	5,14
5	7,01	5,08	8,94
10	9,61	6,21	13,01
50	19,24	8,89	29,59
100	25,8	9,85	41,75
200	34,56	10,41	58,71

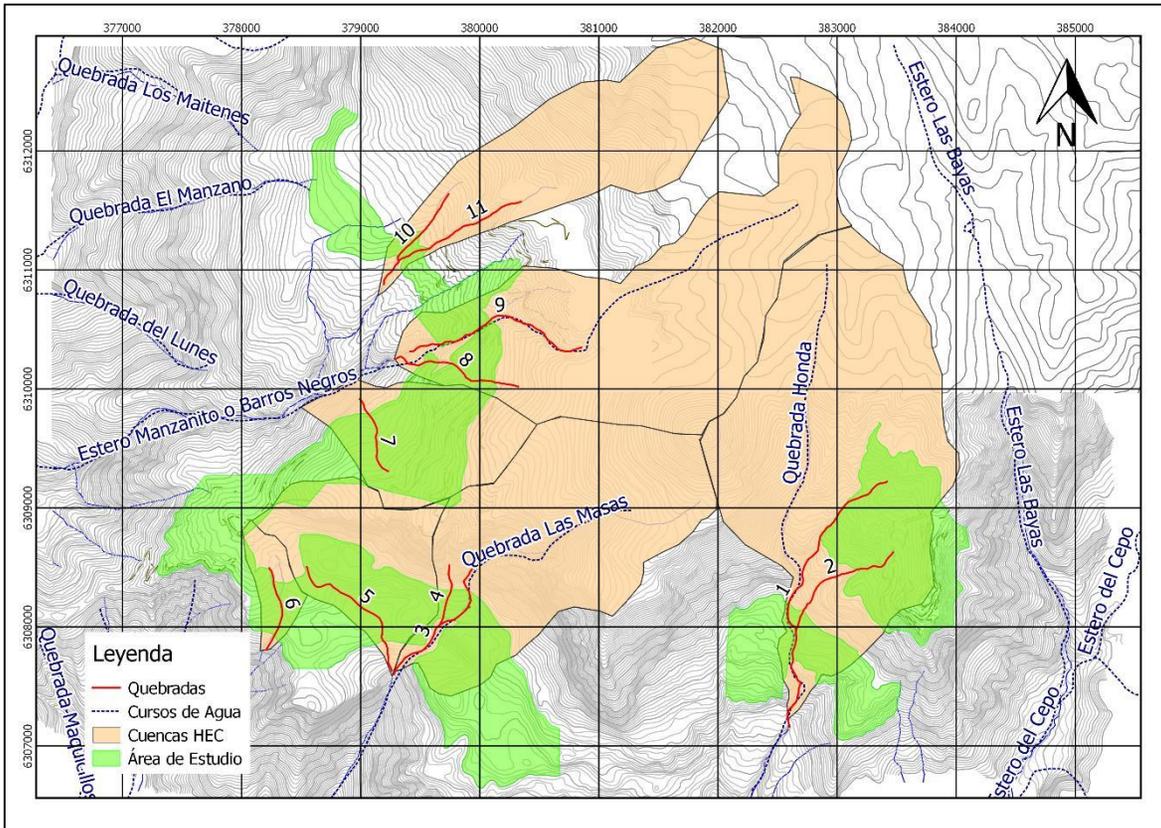
Fuente: Elaboración propia en base a antecedentes SNIA, DGA

2.3.4.4 Caracterización de quebradas y definición de caudales

A partir de estos valores se realizará la transposición de caudales en los puntos correspondientes al área de estudio. Se consideró el valor asociado al límite superior del intervalo de confianza, debido a la alta incertidumbre existente, optando así por una mayor seguridad.

A partir de la información topográfica, imágenes satelitales y de la información recopilada durante la visita a terreno, se identificaron las siguientes quebradas como principales para definir la zona de inundación:

FIGURA N° 2-32 Quebradas identificadas



Fuente: Elaboración propia

A las quebradas identificadas se les asignó un caudal asociado a las cuencas aportantes en los puntos de salida del área de estudio. Este caudal será utilizado posteriormente para el cálculo de la zona de inundación. Como criterio se utiliza el caudal para T= 5, 10, 20, 50 y 100 años.

CUADRO N° 2-8 Caudal de diseño

Quebradas	Área cuenca (Km ²)	Caudal (m ³ /s)					
		T= 2 años	T= 5 años	T= 10 años	T= 50 años	T= 100 años	T= 200 años
1 - 2	5,26	0,25	0,43	0,62	1,41	2,00	2,81
3 - 4	3,46	0,16	0,28	0,41	0,93	1,31	1,85
5	1,45	0,07	0,12	0,17	0,39	0,55	0,77
6	0,31	0,01	0,03	0,04	0,08	0,12	0,17
7	1,36	0,06	0,11	0,16	0,37	0,52	0,73
8 - 9	4,49	0,21	0,36	0,53	1,21	1,70	2,40
10 - 11	2,32	0,11	0,19	0,27	0,62	0,88	1,24

Fuente: Elaboración propia

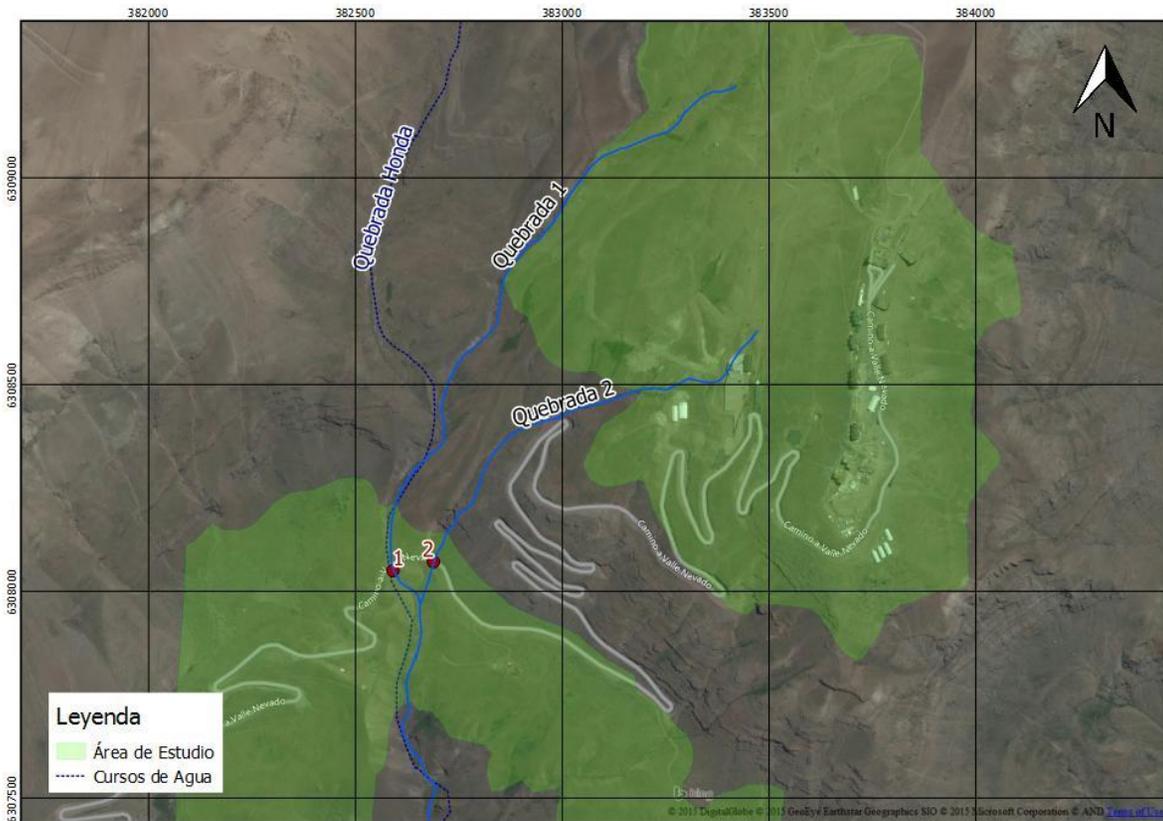
A continuación se presenta una descripción de cada una de las quebradas, de acuerdo a lo observado durante la visita a terreno del día 5 de noviembre de 2015 y a través de imágenes satelitales. Se incluye en cada caso una figura con la ubicación de las quebradas y el punto en que fueron tomadas las fotografías, y además las fotografías tomadas hacia aguas arriba y aguas abajo del punto, según estuvieran disponibles.

Quebradas 1 y 2:

Las quebradas 1 y 2 corresponden a la sub-quebradas de la Quebrada Honda, tal como se muestra en la siguiente figura. La quebrada 1 presenta una alta pendiente hacia aguas arriba del punto 1, disminuyendo levemente hacia aguas abajo. En el caso de la quebrada 2, observada desde el punto 2, la pendiente es más constante y el lecho es mayormente rocoso.

Ambas quebradas se unen aguas abajo del cruce con el Camino Valle Nevado y presentan obras (alcantarillas) en el cruce. Durante la visita a terreno realizada se observó la existencia de flujo producto del derretimiento de la nieve.

FIGURA N° 2-33 Quebradas 1 y 2



Fuente: Elaboración propia

FIGURA N° 2-34 Vista de la Quebrada 1 desde punto 1 hacia aguas arriba (arriba) y aguas abajo (abajo)



Fuente: Archivo fotográfico de terreno

FIGURA N° 2-35 Quebrada 2 vista desde el punto 2 hacia aguas arriba (arriba) y hacia aguas abajo (abajo)

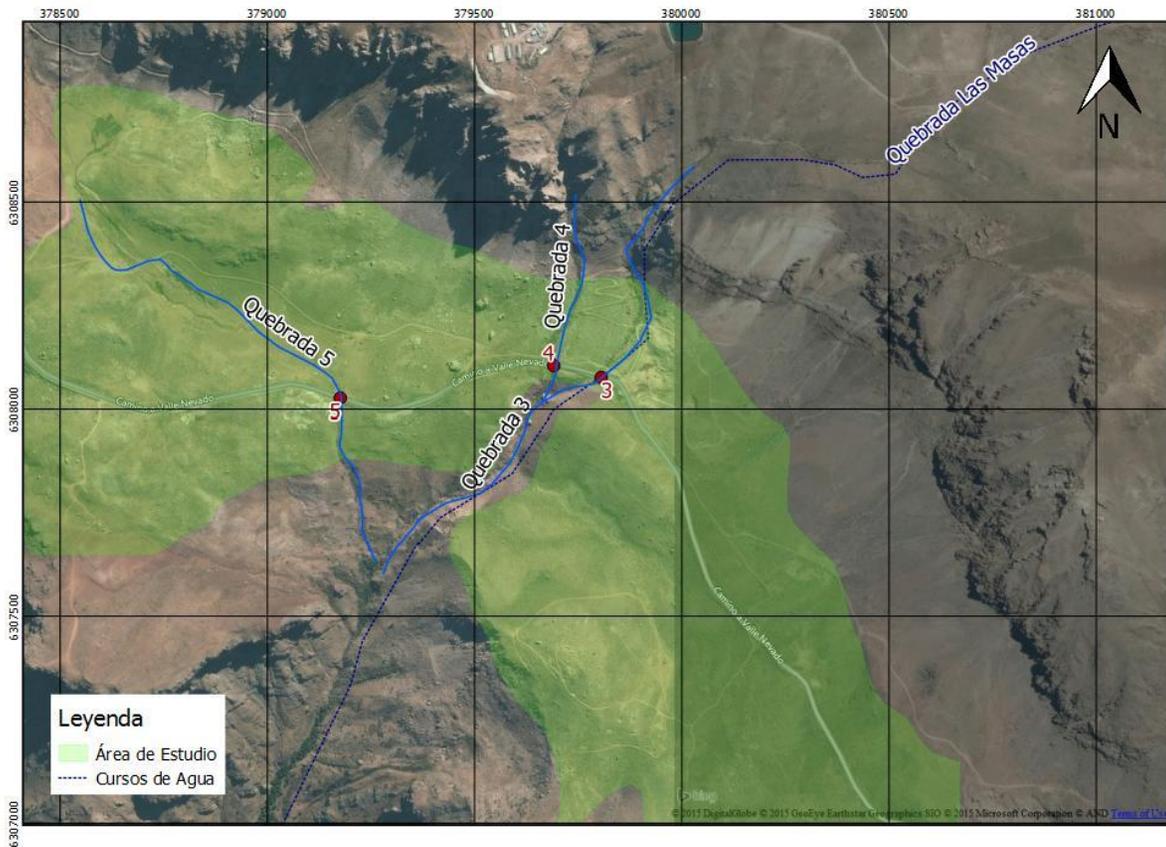


Fuente: Archivo fotográfico de terreno

Quebradas 3, 4, y 5:

La quebrada 3 corresponde a la Quebrada Las Masas, siendo las quebradas 4 y 5 tributarias. Las quebradas 3 y 4 presentan alta pendiente, de acuerdo a lo observado desde los puntos 3 y 4 respectivamente, con un lecho con rocas de hasta 30 a 40 cm de diámetro. En el caso de la quebrada 3, el trazado aguas abajo del cruce con el Camino Valle Nevado es levemente más irregular. Ambas quebradas tienen obras construidas en el cruce con el Camino Valle Nevado (alcantarillas) y se unen aguas debajo de dicho cruce.

La Quebrada 5, por su parte, es de baja pendiente, gran cuenca aportante y parece estar más intervenida. El lecho presenta abundante vegetación y rocas de tamaño pequeño (2 a 4 cm de diámetro). Las fotografías correspondientes se tomaron desde el punto 5.

FIGURA N° 2-36 Quebradas 3, 4 y 5

Fuente: Elaboración propia

FIGURA N° 2-37 Quebrada 3 vista desde el punto 3 hacia aguas arriba (arriba) y hacia aguas abajo (abajo)



Fuente: Archivo fotográfico de terreno

FIGURA N° 2-38 Quebrada 4 vista desde punto 4 hacia aguas arriba (arriba) y hacia aguas abajo (abajo)



Fuente: Archivo fotográfico de terreno

FIGURA N° 2-39 Quebrada 5 vista desde punto 5 hacia aguas arriba (arriba) y hacia aguas abajo (abajo)

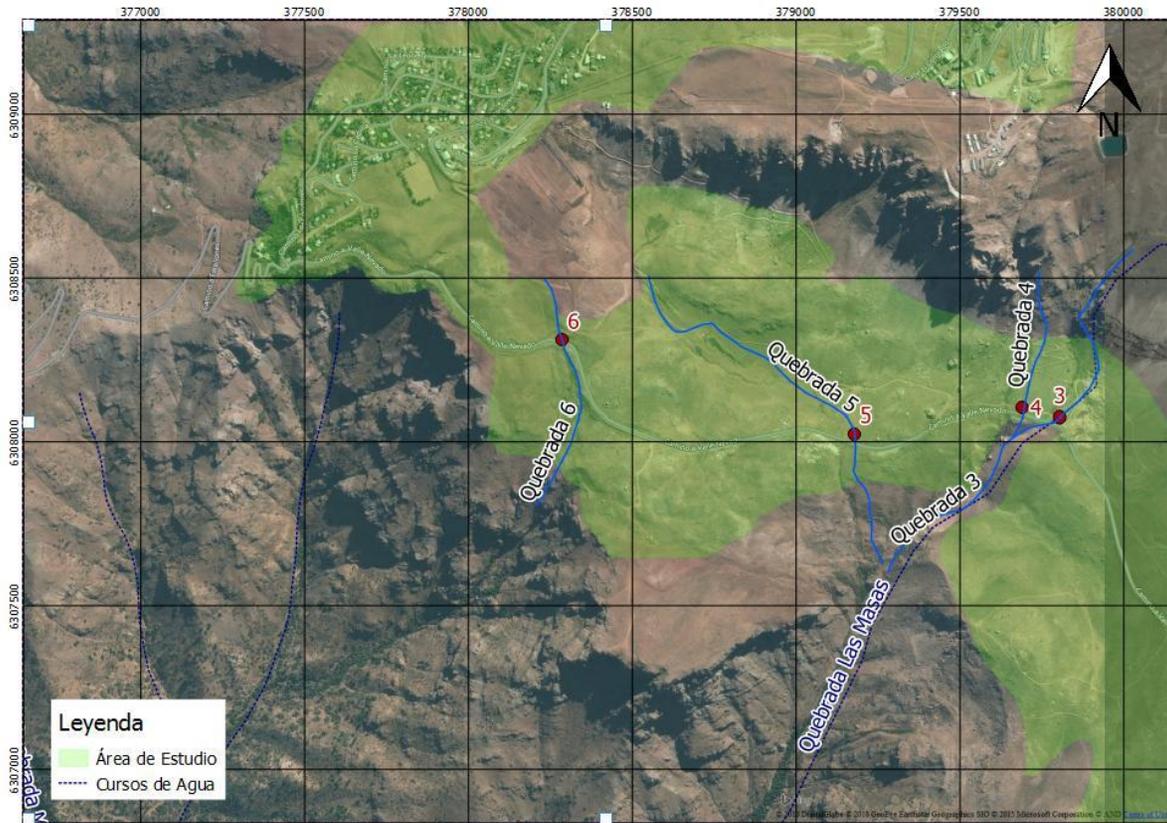


Fuente: Archivo fotográfico de terreno

Quebrada 6:

Esta quebrada posee una gran cuenca aportante, con abundante vegetación y baja presencia de rocas de 2 a 4 cm de diámetro. Cruza el Camino Valle Nevado por medio de una alcantarilla ubicada aproximadamente en el km 1,3. Las fotografías tomadas desde el punto 6 muestran el cambio de pendiente que se produce. Continuando hacia Valle Nevado, pocos metros más adelante, se cruza una nueva quebrada, la cual fue modificada con la construcción del camino y presenta una obra de descarga de agua hacia el camino, de acuerdo a la pendiente que este posee en dicho tramo.

FIGURA N° 2-40 Quebrada 6



Fuente: Elaboración propia

FIGURA N° 2-41 Quebrada 6 desde el punto 6 vista hacia aguas arriba (arriba) y hacia aguas abajo (abajo)

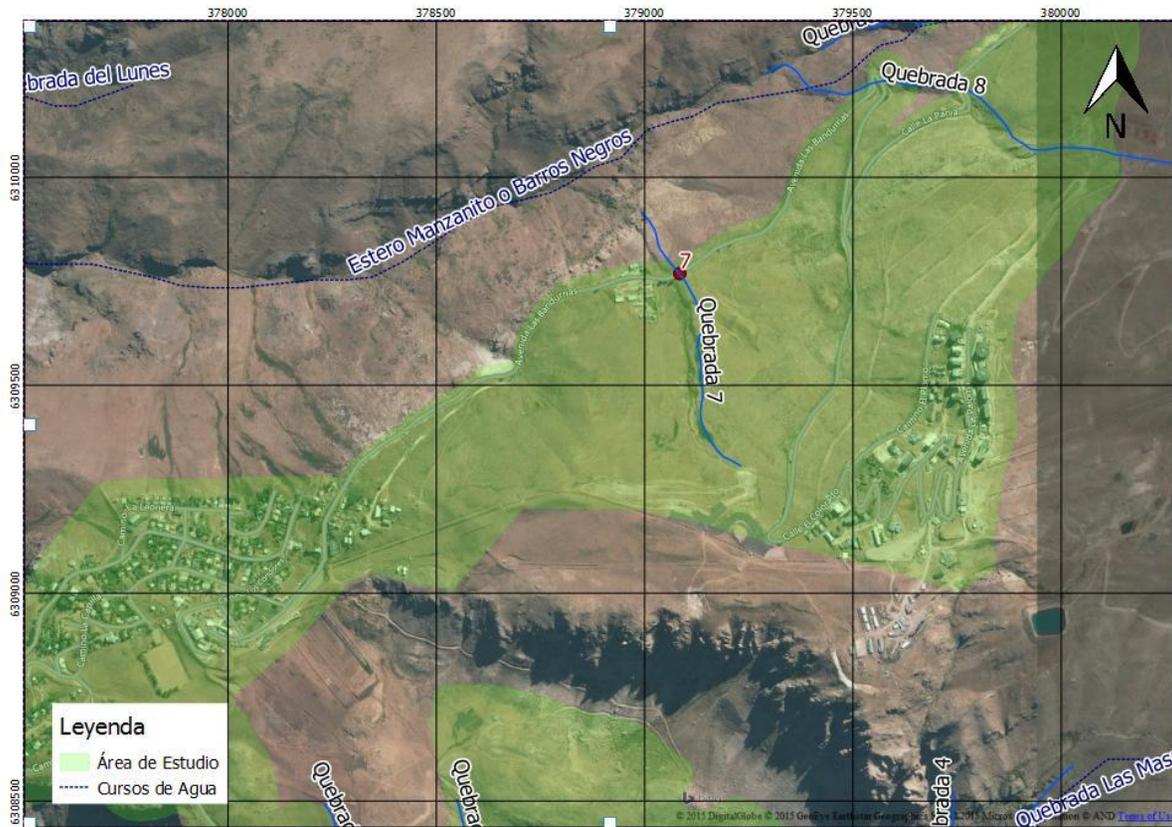


Fuente: Archivo fotográfico de terreno

Quebrada 7:

Esta quebrada es de baja pendiente, y de acuerdo a lo observado durante la visita a terreno del día 5 de noviembre de 2015, en el punto 7. Su área aportante es pequeña y se ubica justo al costado de un área urbanizada. La quebrada es afluente al Estero Manzanito o Barros Negros. Según se observa en las fotografías su lecho corresponde a tierra y pastizales, y existen pequeños arbustos en las planicies de inundación.

FIGURA N° 2-42 Quebrada 7



Fuente: Elaboración propia

FIGURA N° 2-43 Quebrada 7 desde el punto 7 vista hacia aguas arriba (arriba) y hacia aguas abajo (abajo)



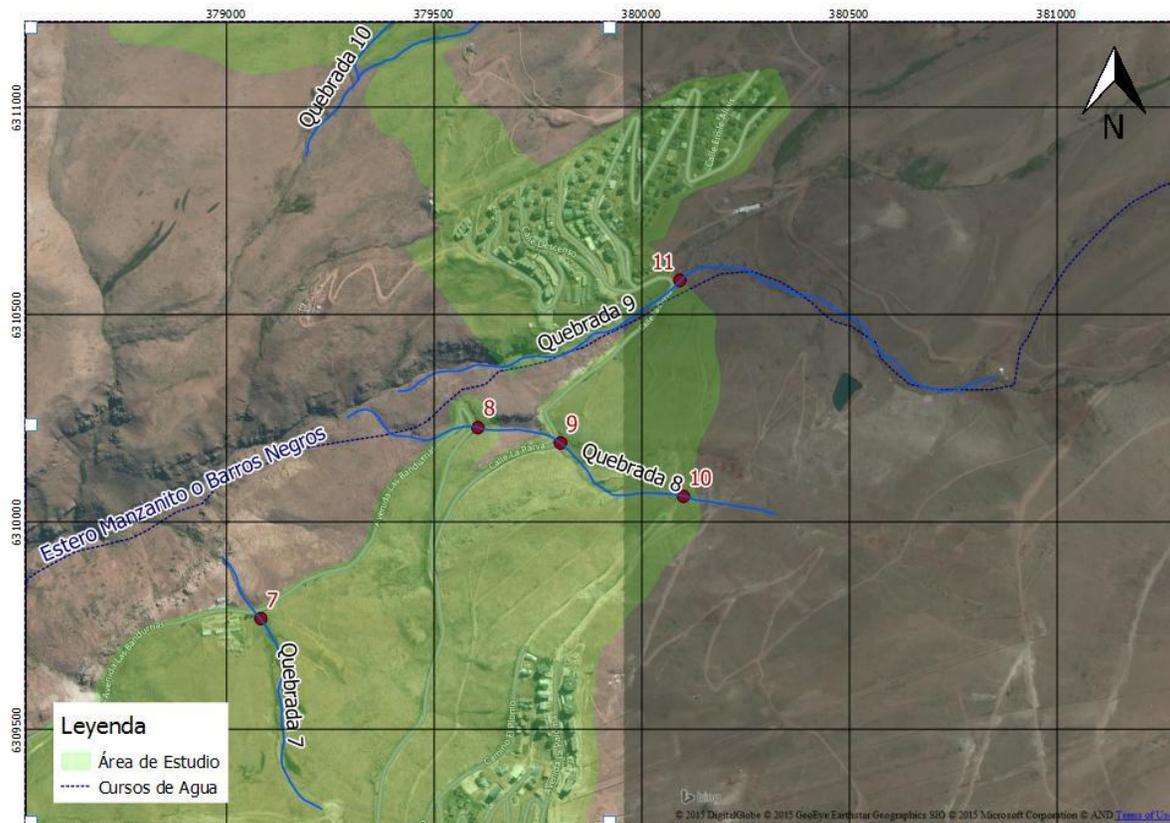
Fuente: Archivo fotográfico de terreno

Quebradas 8 y 9:

Debido a la posición de la quebrada 8 fue posible observarla desde 3 puntos, según se muestra en la siguiente figura (puntos 10, 9 y 8, comenzando desde aguas arriba), los cuales corresponden a dos cruces con el camino Los Cóndores y un tercer punto junto a un camino alternativo. Esta quebrada al igual que la quebrada 7 corresponde a un afluente al Estero Manzanito o Barros Negros. En la parte alta, según lo observado desde el punto 10, se tiene un lecho rocoso y alta pendiente, mientras que hacia aguas abajo, en los puntos 9 y 8, el lecho es más bien de gravas y con menor pendiente.

La quebrada 9 corresponde al Estero Manzanito o Barros Negros y se ubica justo en la entrada del Centro Invernal La Parva. Probablemente presenta una mayor continuidad de flujo de agua, razón por la cual existió una estación de monitoreo, se la cual se conserva únicamente la estructura exterior. Su lecho es de fondo rocoso con piedras de tamaño medio y escasa vegetación, según lo observado desde el punto 11.

FIGURA N° 2-44 Quebradas 8 y 9



Fuente: Elaboración propia

FIGURA N° 2-45 Quebrada 8 vista desde el punto 10 hacia aguas arriba (izquierda) y hacia aguas abajo (derecha)



Fuente: Archivo fotográfico de terreno

FIGURA N° 2-46 Quebrada 8 vista desde el punto 9 hacia aguas arriba (arriba) y hacia aguas abajo (abajo)



Fuente: Archivo fotográfico de terreno

FIGURA N° 2-47 Quebrada 9 vista desde el punto 11 hacia aguas arriba (arriba) y hacia aguas abajo (abajo)



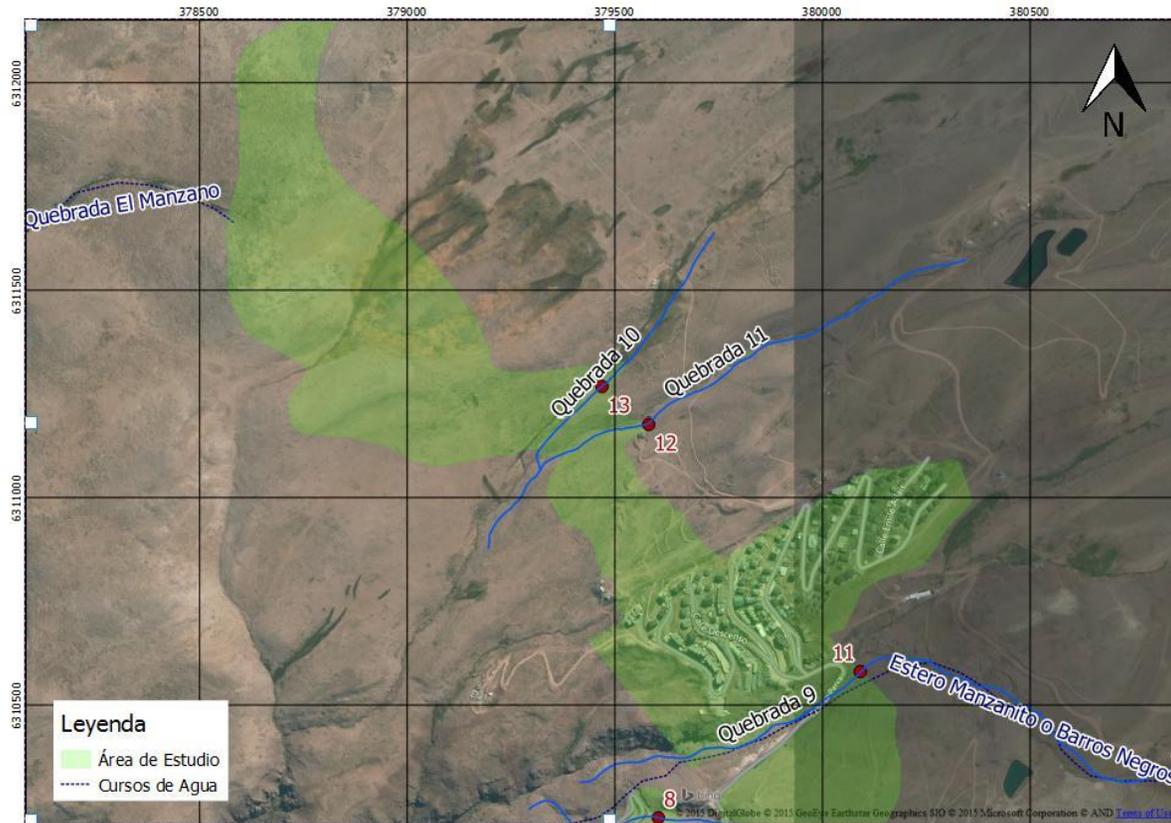
Fuente: Archivo fotográfico de terreno

Quebradas 10 y 11:

La quebrada 10 observada desde el punto 12 presenta pendiente media y un lecho de gravas, con escasa vegetación.

La principal característica de la quebrada 11 es la presencia de humedales en la parte alta. En esta zona la pendiente es baja y el flujo no tiene un cauce definido, presentando un escurrimiento como lámina de agua. Esto se observa en la fotografía tomada desde el punto 13.

FIGURA N° 2-48 Quebradas 10 y 11



Fuente: Elaboración propia

FIGURA N° 2-49 Vista general de la Quebrada 10 desde el punto 12 (arriba) y vista hacia aguas arriba (abajo)



Fuente: Archivo fotográfico de terreno

FIGURA N° 2-50 Vista general del humedal en la Quebrada 11 desde el punto 13



Fuente: Archivo fotográfico de terreno

2.4 Catastro de sitios de interés geológico

Se considera un sitio de interés geológico a aquel lugar que sobresale desde un punto de vista geopatrimonial, o bien, que destaca dentro del contexto geológico por sus valores de uso o culturales (por ejemplo sitios de importancia geológica con potencial turístico). Se consideran, por ejemplo, localidades fosilíferas, formaciones o morfologías inusuales, litologías representativas de ambientes geológicos de importancia dentro del contexto andino, sectores de estudios científicos que han entregado resultados relevantes para el conocimiento de la geología de Chile, entre otros.

Para elaborar el catastro de sitios de interés geológico en el área de análisis, se buscó identificar dos tipos de sitios (de acuerdo con Brilha (2015)):

- Geositios, los que corresponden a lugares que por sus características sean representativos de formaciones o unidades geológicas relevantes dentro del contexto geológico nacional y que, por lo tanto, poseen un alto valor científico, el que requiere una adecuada gestión y protección.
- Sitios de Geodiversidad, dentro de los que se consideran sitios de interés geológico que son representativos de procesos o fenómenos geológicos, y que poseen un alto valor escénico, cultural o pedagógico, lo que otorga el potencial de uso turístico y recreativo.

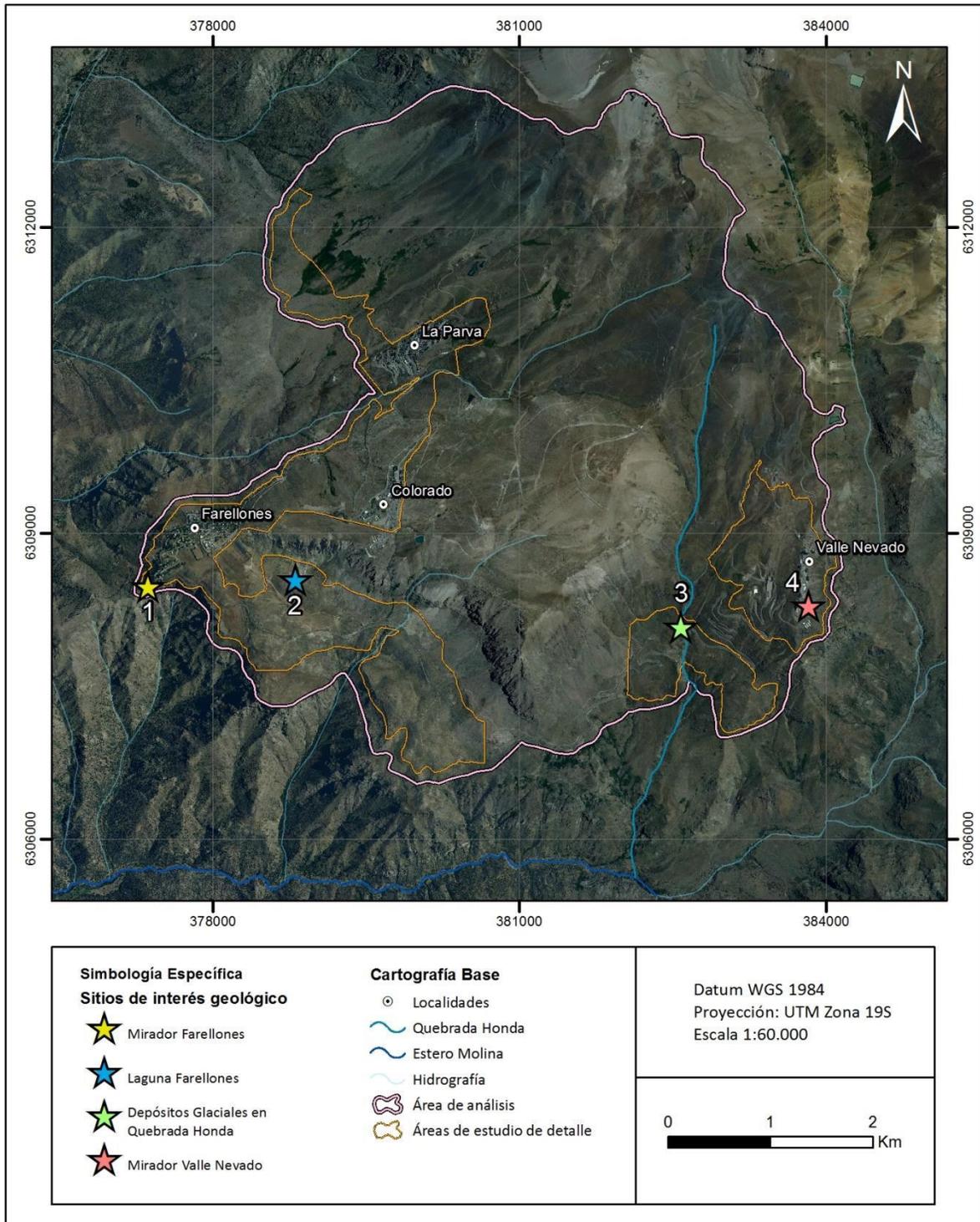
Se identificaron 4 sitios de interés geológicos dentro del área de análisis de este estudio (FIGURA N° 2-51). Para cada uno de los sitios reconocidos se presenta una descripción detallada del lugar en el ANEXO VV.

2.4.1 Sitio de interés geológico N°1: Mirador Farellones

El sitio de interés geológico N°1, referido como "Mirador Farellones", se ubica en la curva 38 de la ruta Camino a Farellones (FIGURA N° 2-51). En él se puede contemplar, hacia el sur, un paisaje que exhibe un potente cuerpo rocoso estratificado representativo de la geología que caracteriza al sector oriente de la Región Metropolitana (FIGURA N° 2-52). Estas rocas corresponden a una secuencia volcanosedimentaria, asociada a las formaciones cenozoicas Farellones y Abanico, que describen una serie de pliegues suaves de escala kilométrica, sinclinales y anticlinales, y que han quedado descubiertas debido a la fuerte incisión generada por el Río Molina. La configuración del relieve actual de esta vista panorámica evidencia una morfología relativamente plana y alzada, conocida como Plateau de Farellones (Armijo, et al., 2010).

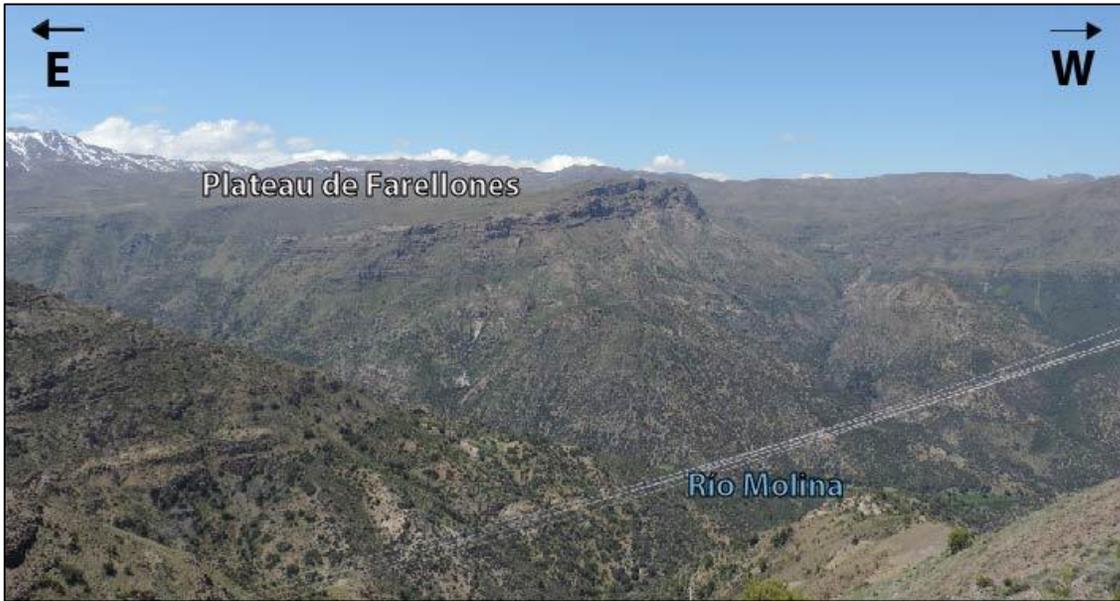
El sitio del Mirador Farellones corresponde a un *sitio de geodiversidad* de acuerdo a la clasificación propuesta por Brilha (2015) y a un sitio tipo *vista panorámica* según la clasificación de Pereira et al. (2007).

FIGURA N° 2-51 Sitios de interés geológico del área de análisis de este estudio.



Fuente: Elaboración propia

FIGURA N° 2-52 Sitio de interés geológico N°1: Vista panorámica de Farellones



Fuente: Archivo fotográfico de terreno

2.4.2 Sitio de interés geológico N°2: Laguna Farellones

Este sitio de interés geológico se ubica a unos 600 m al norte del Camino a Valle Nevado (ubicación referencial en FIGURA N° 2-51 y ubicación exacta en CUADRO VV-1).

La Laguna Farellones corresponde a un cuerpo de agua estacional desarrollado en una depresión topográfica generada producto de grandes deslizamientos antiguos. En el área es posible observar evidencias de distintos tipos de remociones en masa (flujos de barro, deslizamientos y caídas de rocas) (FIGURA N° 2-53), además de las variaciones estacionales del nivel de agua de la laguna (marcadores de niveles del agua en bloques caídos) (FIGURA N° 2-54). En torno a la laguna se observan centenas de bloques caídos con diámetros mayores a 1 m y decenas de ejemplares con de hasta 5 m de diámetro. En la laguna desemboca una pequeña quebrada, a la cual se asocia un abanico aluvial depositado por un flujo de barro reciente.

El sitio de Laguna Farellones corresponde a un *sitio de geodiversidad* de acuerdo a la clasificación propuesta por Brilha (2015) y a un sitio tipo *área* según la clasificación de Pereira et al. (2007).

FIGURA N° 2-53 Evidencias de distintos tipos de remociones en masa en sitio de interés geológico N°2: Laguna Farellones



Fuente: Archivo fotográfico de terreno

FIGURA N° 2-54 Evidencias de variaciones estacionales del nivel de agua de la laguna Farellones (marcadores de niveles del agua en bloques caídos)



Fuente: Archivo fotográfico de terreno

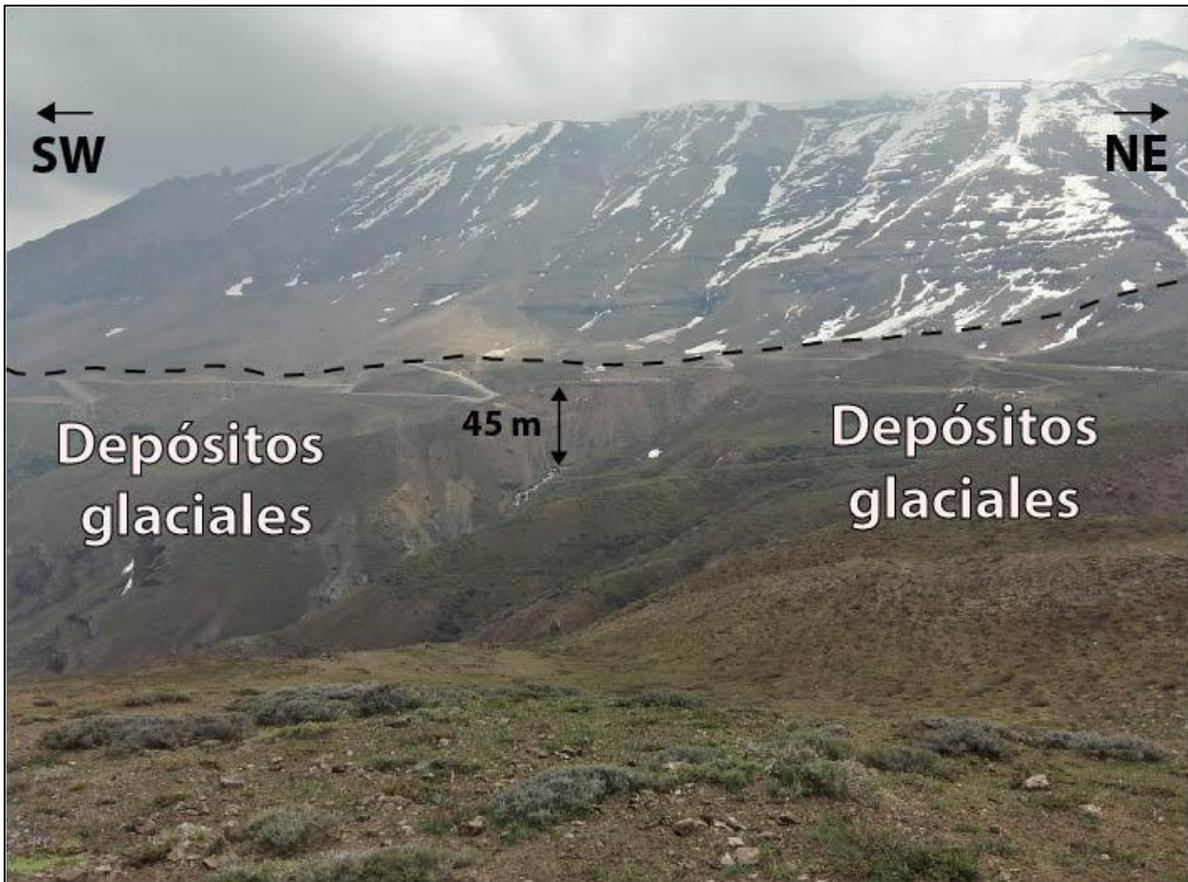
2.4.3 Sitio de interés geológico N°3: Depósitos glaciales Quebrada Honda

Este sitio de interés geológico se encuentra en la intersección entre el Camino a Valle Nevado y la Quebrada Honda, a unos 250 m al norte de la Curva 5 de la misma ruta (ubicación referencial en FIGURA N° 2-51 y ubicación exacta en CUADRO VV-1).

En este sitio se observan depósitos glaciales que se interpretan como material acumulado producto del avance glacial (FIGURA N° 2-55); sin embargo, estos depósitos no han sido estudiados en detalle, por lo que se desconoce su edad. Araya-Vergara (2008) señala que estos depósitos presentan el aspecto de morrenas de recesión. El mismo autor interpreta estas morrenas como herencia de una glaciación interna, la que asocia a la Última Glaciación en base a su emplazamiento altimétrico. Estos depósitos corresponden a sedimentos no consolidados, polimícticos, mal seleccionados, compuestos de bloques angulares de diámetros métricos, generalmente aislados e inmersos en una matriz fina de arenas y limos, aunque localmente también se observan zonas de bloques clastosoportados (FIGURA N° 2-56). En el sitio también es posible observar evidencias de otros procesos más recientes como flujos de detritos y caídas de bloques.

El sitio de Depósitos Glaciales de la Quebrada Honda corresponde a un *sitio de geodiversidad* de acuerdo a la clasificación propuesta por Brilha (2015) y a un sitio tipo *aislado* según la clasificación de Pereira et al. (2007).

FIGURA N° 2-55 Vista general del sitio de interés geológico de Depósitos glaciales de la Quebrada Honda.



Fuente: Archivo fotográfico de terreno

FIGURA N° 2-56 Depósitos glaciales de la Quebrada Honda.



Fuente: Archivo fotográfico de terreno

2.4.4 Sitio de interés geológico N°4: Mirador Valle Nevado

Este sitio de interés geológico fue propuesto como “Mirador Valle Nevado” en el inventario de patrimonios geológicos en la ciudad de Santiago realizado por Rodríguez (2013). Se ubica en la Camino Valle Nevado (FIGURA N° 2-51) a unos 500 m al este de la Curva 18 de la misma ruta (FIGURA N° 2-51). En este sitio se puede observar más de 1.000 m de exposición de la secuencia de la Formación Farellones, que evidencia la marcada estratificación y leve plegamiento que caracteriza a este cuerpo rocoso (FIGURA N° 2-57), así como también acuñamiento y formas que se podrían asociar a flujos volcánicos.

El sitio del Mirador Valle Nevado corresponde a un *sitio de geodiversidad* de acuerdo a la clasificación propuesta por Brilha (2015) y a un sitio tipo *vista panorámica* según la clasificación de Pereira et al. (2007).

FIGURA N° 2-57 Sitio de interés N°4: Mirador Valle Nevado



Fuente: Archivo fotográfico de terreno

2.5 **Catastro de peligros geológicos**

Los peligros geológicos considerados en el catastro son los siguientes:

- Procesos de Remoción en Masa: Deslizamientos, flujos de barro y detritos (conocidos popularmente como aluviones), caída de bloques, desprendimientos. Se marcaron las cicatrices de donde se generaron los procesos de remoción en masa y los depósitos asociados a estos.
- Inundaciones: Por desborde de Cauce y Anegamientos. Para elaborar estos mapas se marcaron los principales puntos de anegamiento y zonas inundadas, además de las fechas en que se produjo la inundación.
- Sismicidad
- Volcanismo

El catastro se realizó a partir de la recopilación bibliográfica, y se complementó en conjunto con la interpretación de fotografías aéreas y visitas a terreno. A partir de lo anterior, se elaboraron mapas de catastro de peligros geológicos, que consisten en ubicar espacialmente los peligros geológicos reconocidos y las zonas afectadas por estos procesos, así como identificar las situaciones que condicionan la ocurrencia de estos fenómenos.

A continuación se presenta el detalle del catastro, el cual fue dividido entre procesos endógenos (Sismicidad y Volcanismo) y exógenos (Remociones en Masa e Inundaciones).

2.5.1 Procesos Endógenos

2.5.1.1 Catastro de sismos e intensidades reportadas para distintos terremotos históricos

La costa oeste de Sudamérica está delineada por el borde occidental de la placa tectónica Sudamericana, y se caracteriza por su sismicidad activa, la que a su vez es causada por la convergencia con la placa tectónica de Nazca. Este fenómeno produce un alto nivel de acoplamiento mecánico en la zona de contacto, lo que genera la acumulación de grandes cantidades de energía que, al liberarse, ocasionan grandes terremotos. Esto se presenta en forma de 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 & Hackney, 2006). En consideración de estas condiciones geológicas, Chile históricamente ha sido afectado por grandes terremotos.

Cabe señalar que los terremotos ocurridos en Chile previamente al año 1960 no han sido registrados mediante sismómetros modernos, razón por la cual 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 & Ramírez (1992).

2.5.1.2 Antecedentes Históricos

El registro histórico de los principales terremotos que han afectado la zona de estudio se detalla a continuación. Estos corresponden tanto a sismos de interplaca tipo thrust⁵, como de intraplaca de

⁵ Para ver las definiciones de los tipos de terremotos ver ANEXO TT.1.1 "Sismicidad".

profundidad intermedia. La recopilación de los datos se obtuvo a partir de Urrutia & Lanza (1993) y Petit-Breuilh (2001). Los largos de ruptura de tales sismos (considerando solo aquellos con magnitud estimada y/o calculada > 7.2) se presentan en la FIGURA N° 2-58 (también se incorporan los terremotos post 2001 hasta la fecha). En el CUADRO N° 2-9, se presentan las características de los sismos con magnitud estimada y/o calculada > 7.5 , cuyas zonas de ruptura coinciden aproximadamente con el área de estudio.

Terremoto del 13 de Mayo de 1647: La ciudad de Santiago quedó prácticamente arruinada, se cayeron la mayoría de los edificios. Los efectos del terremoto abarcaron desde los ríos Limarí y Choapa por el norte y hasta Cauquenes y Maule por el sur.

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

Terremoto del 8 de Julio de 1730 ($M \approx 8.9$): 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 afectó la zona centro y sur de Chile.

Terremoto del 19 de Noviembre de 1822: Sismo que fue sentido desde Illapel hasta Chiloé. Valparaíso y Quillota fueron afectados, falleciendo en la primera 66 personas. En Santiago no se registraron personas muertas.

Terremoto del 2 de Abril de 1851: Terremoto que causó daños de consideración en Valparaíso y Santiago, dejando una decena de muertos y varios heridos. Grandes daños se registraron en el pueblo de Renca y Pudahuel.

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. Daños menores en Santiago y Valparaíso.

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 Santiago se registraron daños de consideración. Hubo levantamientos de terreno en la costa.

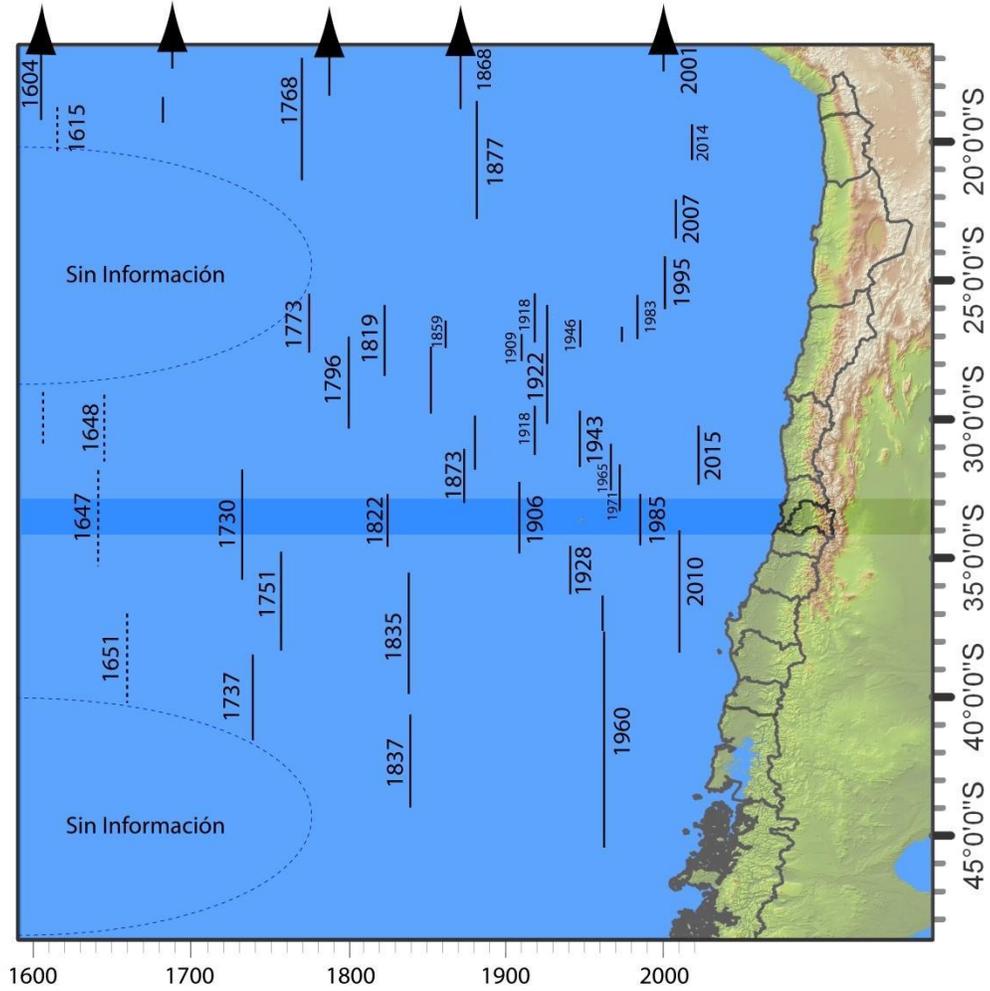
Terremoto del 14 de Abril de 1927: Se estima que el epicentro fue cercano a la frontera entre Chile y Argentina a la latitud de Mendoza. Las zonas afectadas fueron Santiago, San Felipe, Los Andes, Mendoza. El sismo produjo grandes daños, pérdidas humanas y heridos.

Terremoto del 28 de Marzo de 1965 ($M=7.6$): El epicentro se encontró en la comuna de la Ligua. La profundidad del foco fue de 50 a 60 km. Es considerado un terremoto de intraplaca de profundidad intermedia. En Santiago murieron dos personas

Terremoto del 8 de Julio de 1971 ($M=7.75$): Afectó principalmente las zonas de Coquimbo, Aconcagua, Valparaíso y Santiago. Es considerado un terremoto de intraplaca de profundidad intermedia.

Terremoto del 3 de Marzo de 1985 ($M=7.7$): El movimiento se sintió desde la III y IX región. Con este terremoto hubo destrucción de viviendas que causaron víctimas fatales, destrucción de pavimentos, caída de puentes.

FIGURA N° 2-58 Terremotos de subducción históricos (interplaca e intraplaca de profundidad intermedia) con magnitud estimada y calculada mayor a 7.2, y sus segmentos de ruptura.



Fuente: Elaboración propia. En línea continua las zonas de ruptura bien identificadas, en línea discontinua las zonas de ruptura inferidas.

CUADRO N° 2-9 Datos de terremotos históricos de subducción (interplaca e intraplaca de profundidad intermedia) con magnitud superior a 7.5, cuyas zonas de ruptura coinciden aproximadamente con la latitud del área de estudio.

Latitud	Longitud	Profundidad	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 km	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 con base en Kausel & Ramírez (1992).

Además de los sismos ya mencionados, es necesario considerar también los terremotos recientes del 27 de febrero del 2010 (epicentro 44 km al oeste de Cobquecura) y del 16 de septiembre de 2015 (epicentro 37 km al noroeste de Los Vilos). Aunque estos terremotos tuvieron áreas de ruptura que no coinciden latitudinalmente con el área de estudio (ver FIGURA N° 2-58), se han incluido, ya que se les asocian altas intensidades reportadas en la Región Metropolitana (ver CUADRO N° 2-10)

CUADRO N° 2-10 Datos de principales terremotos recientes cuyas áreas de ruptura no coinciden con el área de estudio, pero están asociados a altas intensidades en la Región Metropolitana

Latitud	Longitud	Profundidad (km)	Magnitud (Mw)	Año	Mes	Día	Intensidad en Reg. Metropolitana
-36.29	-73.24	30.1	8.8	2010	02	27	VIII
-31.64	-71.74	23.3	8.4	2015	09	16	VI-VII

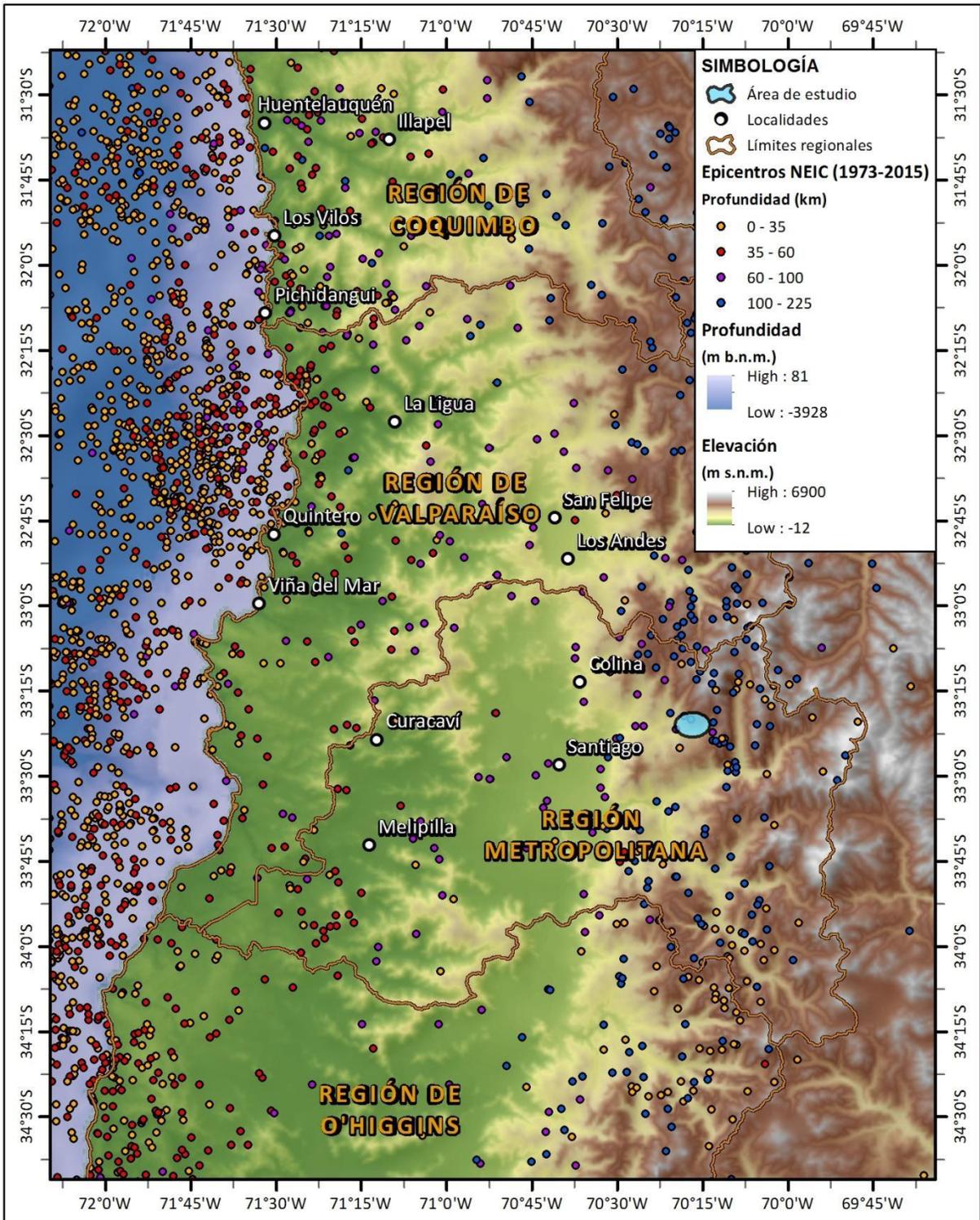
Fuente: Elaboración propia en base a datos del Servicio Sismológico Nacional (www.sismologia.cl)

2.5.1.3 Sismos registrados por la red sismológica mundial

En la FIGURA N° 2-59 se presentan los sismos registrados entre 1973 y 2015 por el Catálogo NEIC, para eventos de magnitud > 4.

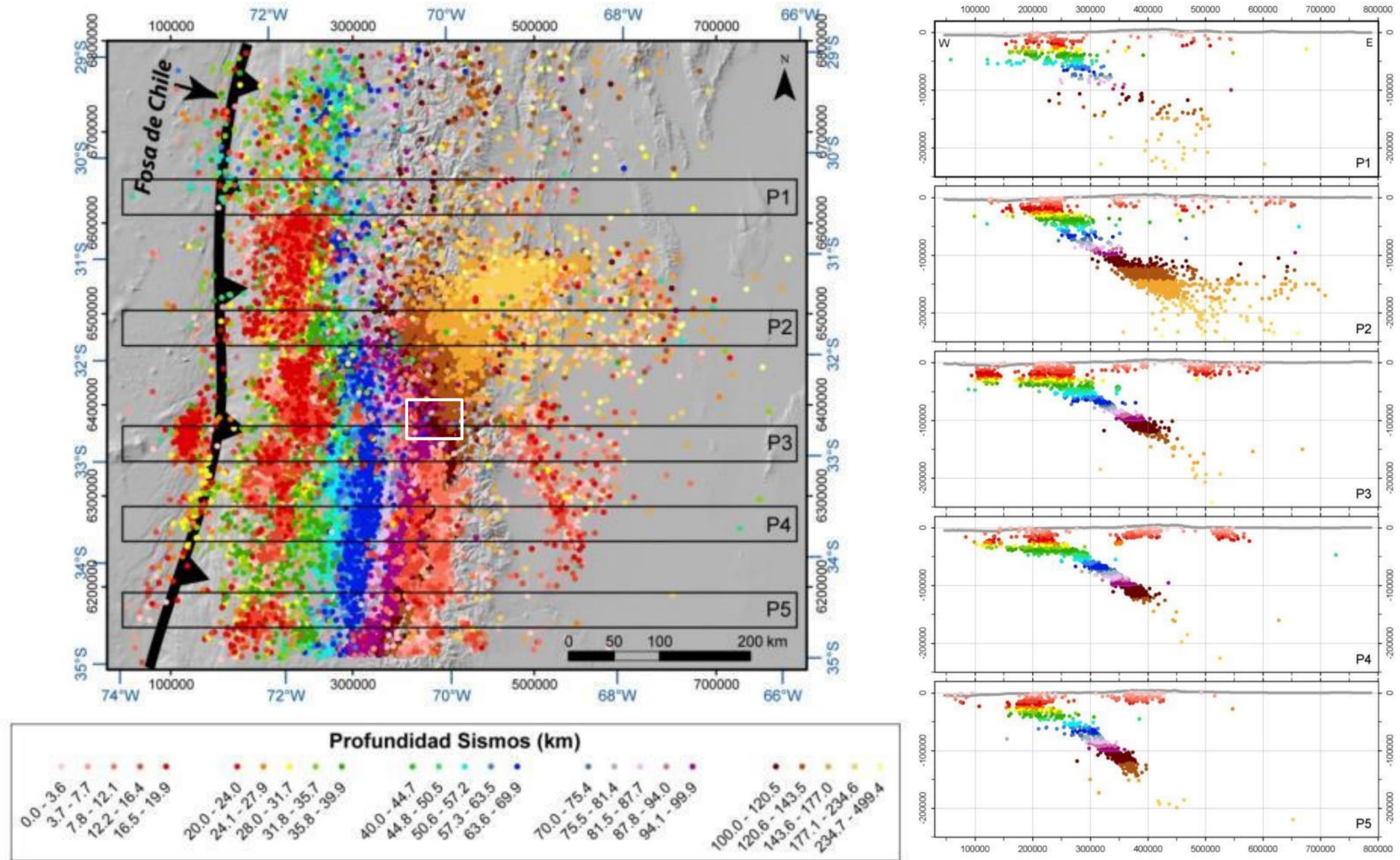
Adicionalmente, con el fin de contar con una cantidad de datos suficientes para elaborar perfiles, en la FIGURA N° 2-60 se presenta un mapa con la sismicidad registrada para eventos de magnitud > 3, entre los años 1973 y 2010, junto con una serie de perfiles que muestran cómo se distribuye la sismicidad en profundidad.

FIGURA N° 2-59 Sismos registrados entre 1973 y 2015 por el Catálogo NEIC, eventos de magnitud > 4.



Fuente: Elaboración propia a partir del Catálogo NEIC.

FIGURA N° 2-60 Sismos de magnitud >3 registrados entre 1973 y 2010 del Catálogo NEIC (izquierda), junto a perfiles de la sismicidad (derecha)



Fuente: Elaboración propia a partir del Catálogo NEIC. El área de estudio se ubica aproximadamente en el recuadro blanco, en la zona correspondiente al perfil P3.

A partir de la FIGURA N° 2-60, es posible realizar una serie de observaciones respecto a la distribución espacial de la sismicidad entre los 29°S y los 35°S.

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 $M_W = 7.7$ respectivamente.
2. Al sur de los 31°S, hay una gran cantidad de sismos ubicados bajo los 60 km, estos son los denominados sismos intraplaca de profundidad intermedia. Aproximadamente 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 31°S. Ejemplos de estos sismos son los de 1965 y 1971, los cuales tuvieron profundidades entre los 50 y 60 km, y magnitudes $M_W = 7.6$ y $M_W = 7.7$ respectivamente, y que afectaron fuertemente la zona en estudio.
3. Desde los 32° S hacia el sur, se aprecia una gran cantidad de eventos sísmicos superficiales en la zona cordillerana, de profundidad menor a 20 km, que están asociados a los procesos de deformación actualmente activos.

En síntesis, 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 la placa de Nazca subducta a la placa Sudamericana.

2.5.1.4 Fuentes sísmicas reconocidas a nivel regional

En el área de estudio se reconocen tres fuentes sismogénicas principales: interplaca, intraplaca de profundidad intermedia y eventos corticales superficiales (ver definiciones de los tipos de terremotos en el ANEXO TT.1.1 "Sismicidad").

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 estimadas fueron de $M_W = 8.2$ y $M_W = 7.7$ respectivamente. Esta latitud, por lo tanto, se considera una fuente activa que puede generar terremotos interplaca destructivos en la zona de estudio.

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 un mayor impacto en la zona de estudio corresponden a sismos de estas características (sismos de 1965 y 1971). Además, el

aumento en la concentración de estos sismos registrados al sur de los 31° de latitud sur, abarcando la zona de estudio (cercana a los 33° sur), permite considerar que la zona tiene el potencial de generar grandes terremotos como los ya mencionados.

3. Sismos Corticales

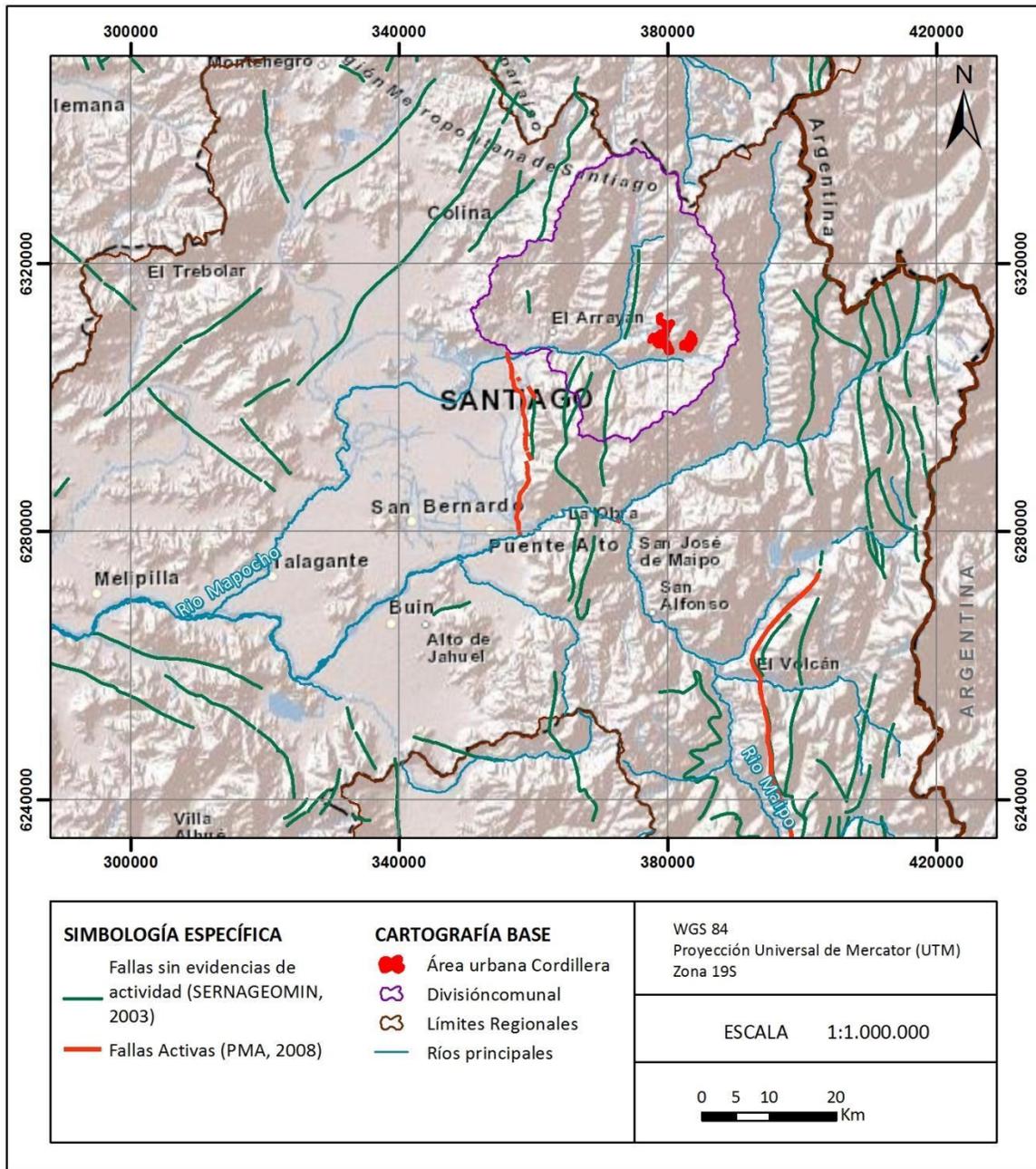
Corresponde a sismos producidos por fallas superficiales, cuyos focos se encuentran a una profundidad menor a 30 km, y están asociados a fallas geológicas activas en superficie. De acuerdo al mapa construido en base a SERNAGEOMIN (2003) y a PMA-CGA (2008) (FIGURA N° 2-60), que recopila antecedentes generales 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 N° 2-60, los cuales dan cuenta que los sismos corticales aparecen en aumento desde los 32° de latitud hacia el sur. En particular, el perfil que abarca la zona de estudio (FIGURA N° 2-60) 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 aún activos y que liberan esfuerzos, en forma de sismos, en fallas corticales activas.

La Comuna de Lo Barnechea se ubica en el límite entre la Cordillera Principal y la Depresión Central, zona que se conoce como frente cordillerano occidental. El frente cordillerano occidental está caracterizado por la ocurrencia de fallas inversas que alzan la cordillera respecto a la depresión central. Lo anterior está evidenciado por morfologías como escarpes de falla, terrazas fluviales deformadas, abanicos aluviales cortados por falla y estructuras como pliegues y fallas secundarias que afectan tanto a rocas como a depósitos no consolidados, lo que corresponde a evidencias geológicas de fallas activas (Rauld (2002), (2011), Armijo et al. (2010)).

En el frente cordillerano occidental la falla más estudiada corresponde a la Falla San Ramón, y su traza superficial está bien delimitada al oeste de Santiago entre los ríos Mapocho y Maipo (Rauld (2002), (2011), Armijo et al. (2010)). La Falla San Ramón corresponde a la falla inversa más occidental de la cordillera principal y que alza la cordillera sobre el valle central. Esta falla presenta evidencias de actividad durante el Cuaternario, incluyendo el Holoceno, y ha estado activa al menos desde el Mioceno, ya que deforma rocas de la Formación Abanico.

El trazado reconocido de la Falla San Ramón se sigue en el Valle de Santiago hasta el Cerro Alvarado por el norte (Rauld, 2002). En la comuna de Lo Barnechea no ha sido estudiado con detalle, pero se considera que el frente cordillerano occidental, corresponde al sector entre el cordón de las Pozas y el valle del estero El Arrayán, en base a las estructuras y morfologías que se observan en dicho sector y su relación con la traza de la falla San Ramón ubicada más al sur.

FIGURA N° 2-61 Fallas activas cercanas al área de este estudio.

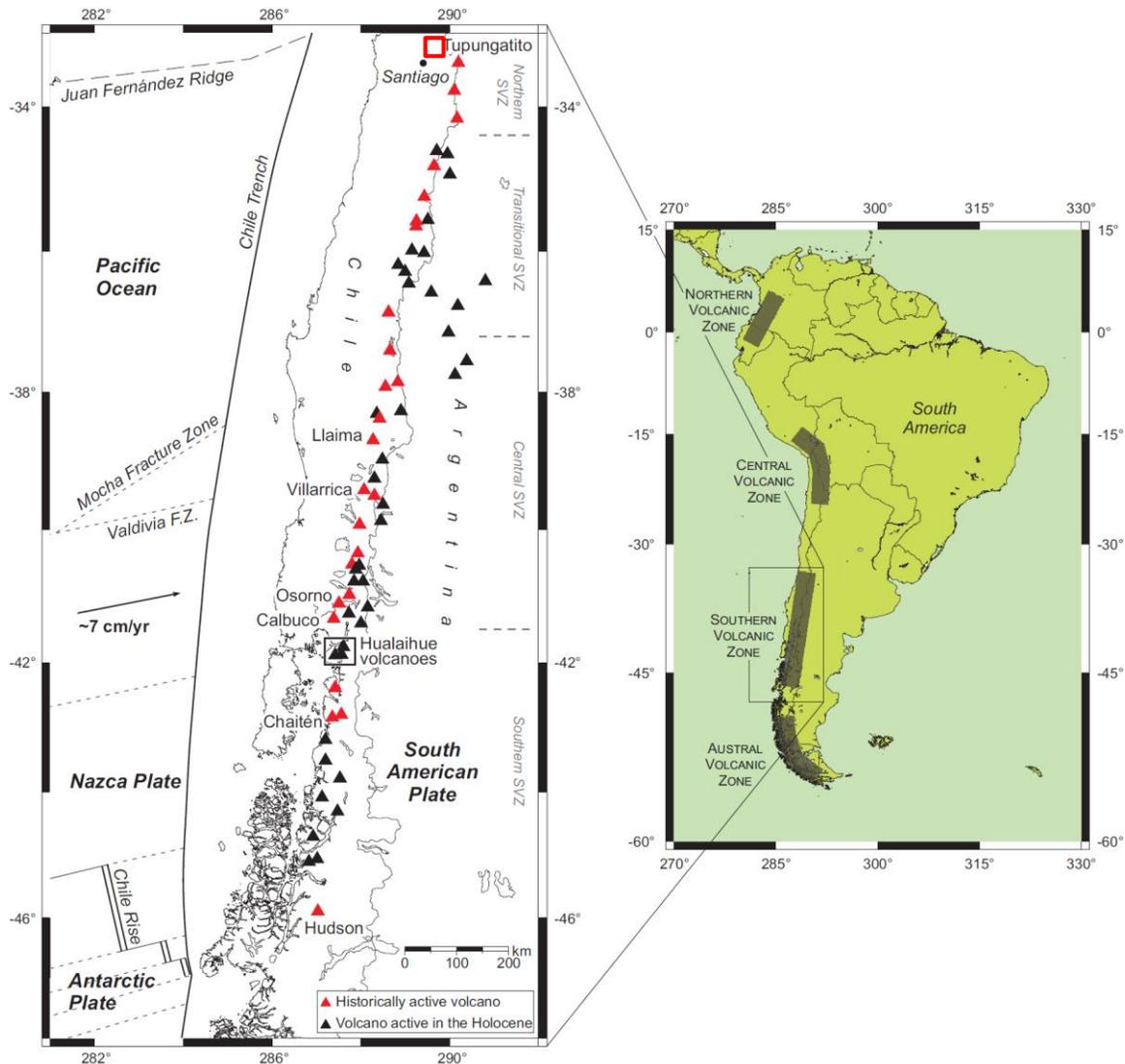


Fuente: Elaboración propia a partir de SERNAGEOMIN (2003) y PMA-CGA (2008).

2.5.1.5 Catastro de centros volcánicos y evidencias de actividad volcánica

Chile se dispone en la franja de Fuego del Pacífico, situada en las costas del Océano Pacífico, que se caracteriza por concentrar una intensa actividad sísmica y volcánica en las zonas que abarca. En particular, el área de estudio se ubica ligeramente al oeste del extremo norte del segmento denominado Zona Volcánica Sur (ZVS) (FIGURA N° 2-62), desarrollado a lo largo de 1400 km del margen andino, desde los 33,3° (Volcán Tupungatito) hasta los 45,9° latitud sur (Volcán Hudson). De acuerdo a Moreno (1993), esta zona tiene uno de los índices más altos de actividad volcánica, con un promedio de una erupción cada 0,7 años entre 1800 y 1990.

FIGURA N° 2-62 Mapa General de la Zona Volcánica Sur. El cuadrado con borde de color rojo muestra la ubicación aproximada del área de estudio.



Fuente: Modificado de Watt (2010)

En la FIGURA N° 2-63, se muestran los centros volcánicos activos e inactivos, junto con los depósitos volcánicos recientes (Pleistoceno a Cuaternario) próximos al área de estudio. Los volcanes activos más próximos al área de estudio son (de norte a sur): (1) Tupungatito, (2) San José y (3) Maipo, asociados a la ZVS (González-Ferrán, 1995).

Estos volcanes ocupan los puestos 54, 33 y 59, respectivamente, en el ranking de los volcanes activos más peligrosos de Chile, nómina elaborada por el SERNAGEOMIN⁶ de acuerdo a tres criterios: (1) que el volcán haya tenido algún nivel de actividad comprobable en los últimos 10 años o que los instrumentos muestren que tiene actividad, (2) que se encuentre cerca de centros poblados y (3) que represente un riesgo para las personas o la infraestructura pública y privada.

Los tres centros volcánicos activos corresponden a estratovolcanes simples y compuestos, con evidencias de actividad volcánica histórica (González-Ferrán, 1995), aunque sin influencia directa sobre el área de estudio. Constituyen centros en los cuales los registros de actividad explosiva se hallan subordinados, en la mayoría de los casos, a las emisiones lávicas, y donde la actividad fumarólica es frecuente.

El más cercano al área de estudio, el volcán Tupungatito, se encuentra a 40 km. de ella (FIGURA N° 2-63). Se sitúa en la cabecera de la cuenca del río Colorado, mientras que el área de estudio, ubicada dentro de la comuna de Lo Barnechea, se emplaza en la cuenca del río Mapocho⁷, por lo que se considera que no está directamente influenciada por este centro volcánico, pese a su relativa cercanía. A pesar de que los otros dos volcanes también influyen a las partes altas de la cuenca del Maipo, no existe conexión hidrográfica con el área de estudio.

Con respecto a los registros de erupciones históricas de estos volcanes,

- Volcán Tupungatito: las erupciones del Tupungatito varían entre 19 eventos desde 1829 (González-Ferrán, 1995) y 25 eventos desde 1646 (Petit-Breuilh, 2004). Son erupciones mayoritariamente de baja magnitud, con un índice de explosividad menor que 2 (González-Ferrán, 1995).
- Volcán San José (situado a unos 60 km al sureste del área de análisis): existen numerosos reportes de actividad eruptiva reciente de este volcán que sugieren que alcanzarían hasta 22 eventos posiblemente ocurridos entre 1822 y 1960. Este centro se caracteriza por presentar actividad fumarólica permanente con explosiones freáticas ocasionales, acompañada de pequeñas columnas de piroclastos, probablemente reciclados (González-Ferrán, 1995). A pesar de ser este un volcán históricamente activo, una revisión actualizada del registro histórico (Petit-Breuilh, 2011) indica que no existen evidencias claras de erupciones importantes.
- Volcán Maipo (situado a unos 100 km al sureste del área de análisis): los antecedentes de erupciones históricas son dudosos; sin embargo, González-Ferrán (1995) sugiere alrededor de una docena de erupciones desde el siglo XVIII.

⁶ "Ranking de los 90 volcanes activos de Chile", nómina actualizada al 2015. Disponible en: <http://www.semageomin.cl/archivos/Ranking-de-Volcanes.pdf>

⁷ Aunque el río Mapocho y el río Colorado pertenecen a la cuenca del río Maipo, la cabecera de la cuenca del río Mapocho, donde se ubica el área de estudio, no posee conexión directa con la hoya del río Colorado, y tanto el Cordón del Quempo como el valle del río Olivares actúan de barrera divisoria entre ambas subcuencas del Maipo.

Luego, el registro de erupciones históricas en sectores cercanos al área de estudio indica un total de 59 en los últimos 400 años.

En la FIGURA N° 2-63 se observa que el área de estudio no ha sido afectada por coladas de lava. Por otra parte, en el registro geológico se reconoce la Ignimbrita Pudahuel (Stern, et al., 1994), la cual aflora en la parte oeste de la ciudad de Santiago, en las cercanías de Melipilla, y también al este del volcán Maipo, en Argentina. Stern, et al (1994) les asigna a estos depósitos una edad de 440 ka⁸, y señala que habrían sido producidos por una gran explosión de la Caldera El Diamante, en donde posteriormente se emplazó el Volcán Maipo. Este tipo de erupciones explosivas generan flujos piroclásticos que poseen altas velocidades y alcanzan grandes distancias. Es por esto que el peligro volcánico puede existir en una región, aunque los volcanes más cercanos estén a muchos kilómetros de distancia.

CUADRO N° 2-11 Principales volcanes en sectores cercanos al área de estudio.

Volcán	Ubicación	Altitud m s.n.m.	Volumen Eruptado (en km ³)	Edad Volcán	Erupciones Históricas	Productos Erupción
Tupungatito	33° 24' S 69° 48' O	5.933	6	Histórico	25 (1646 – 1986)	Lavas, Cenizas
San José	33° 46' S 69° 55' O	6.070	95	Plioceno	22 (1822 – 1960)	Lavas, Domos, Avalanchas
Maipo	34° 10' S 69° 52' O	5.290	25	Pleistoceno	12? (s/XVIII-?)	Lavas, Domos

Fuente: Sruoga (2002), González-Ferrán (1995) y fichas de los volcanes Tupungatito⁹ y San José¹⁰ elaboradas por el SERNAGEOMIN.

Cabe destacar que los tres volcanes activos cercano al área de estudio tienen vigilancia desde el SERNAGEOMIN. De acuerdo al Reporte de Actividad Volcánica para la Región Metropolitana¹¹ publicado el 03 de noviembre del 2015 en la web del organismo, tanto el volcán Tupungatito como el San José presentan un comportamiento estable.

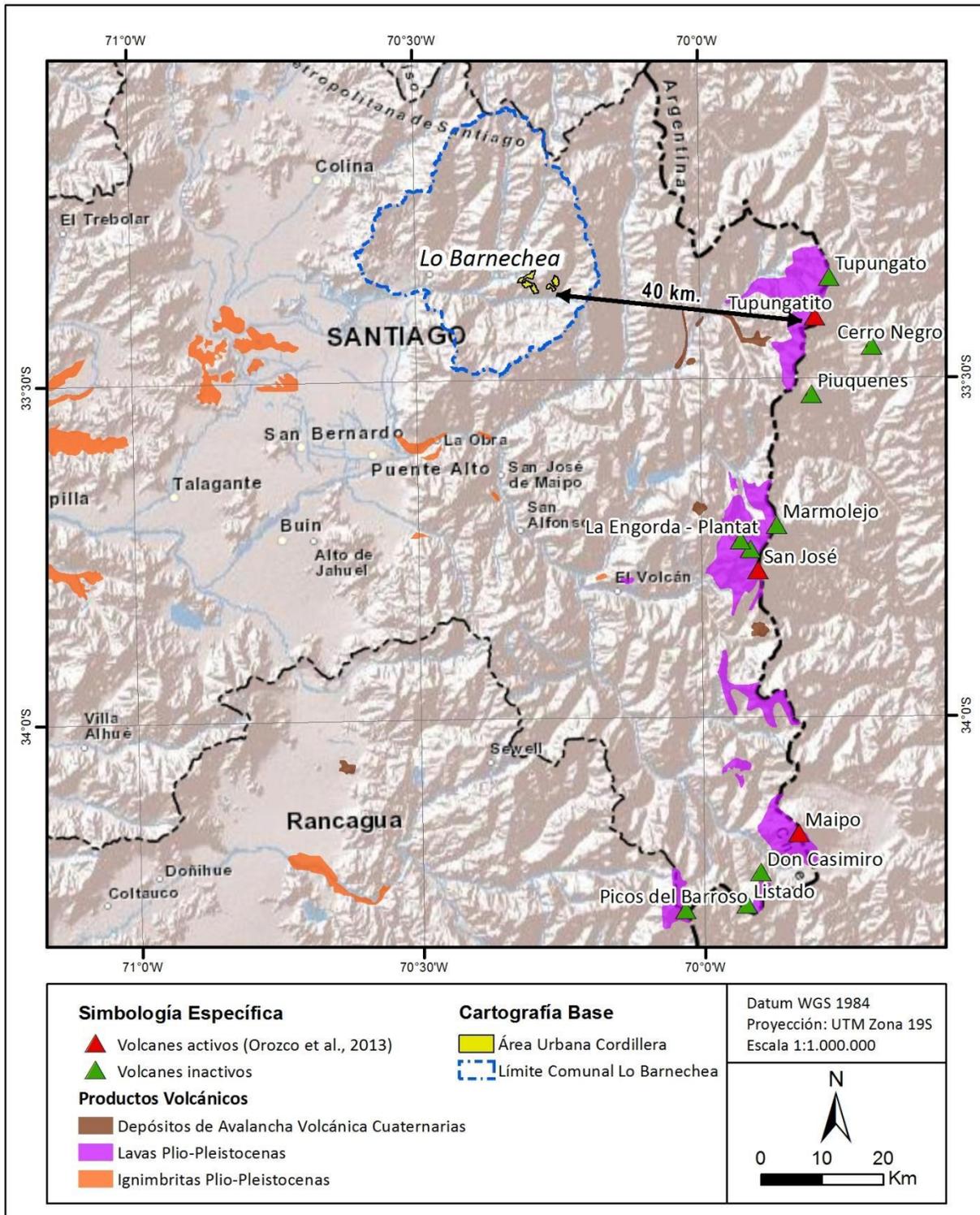
⁸ ka: Miles de años.

⁹ <http://www.sernageomin.cl/archivosVolcanes/20121029125714338FichaVnTupungatito.pdf>

¹⁰ <http://www.sernageomin.cl/archivosVolcanes/20140128050032941FichaVnSanJose.pdf>

¹¹ http://www.sernageomin.cl/reportesVolcanes/20151103041840826RAV_Metropolitana_Octubre_v010.pdf

FIGURA Nº 2-63 Ubicación de los centros volcánicos próximos al área de estudio



Fuente: Elaboración propia a partir de Orozco et al. (2013) y SERNAGEOMIN (2003).

2.5.2 Procesos Exógenos

2.5.2.1 Catastro de remociones en masa

Las remociones en masa se identificaron a partir de la recopilación bibliográfica, búsqueda en prensa, entrevista con el encargado de emergencias municipal, análisis de imágenes satelitales, fotografías aéreas y observaciones en terreno, con el objetivo de generar un inventario espacial e histórico de estos fenómenos. En la FIGURA N° 2-64 se presenta un mapa con la ubicación de los eventos catastrados.

En el presente estudio se reconocieron más de 200 remociones en masa dentro del área de análisis, lo que indica la importancia que tienen estos procesos dentro del área estudiada. Dentro de los tipos de remociones en masa reconocidas se cuentan deslizamientos (de roca, suelo o una combinación de ambos), caídas de bloques, caídas de detritos, flujos de barro y/o detritos, evidencias de erosión en laderas en forma de cárcavas y arrastre superficial de material y avalanchas de nieve.

A continuación se detallan las características de los eventos reconocidos a partir de antecedentes (bibliografía, artículos de prensa y entrevista con encargado de emergencias municipal) y los eventos reconocidos directamente por el equipo consultor, a partir del análisis de imágenes satelitales y fotografías aéreas y/o identificados directamente en terreno.

2.5.2.1.1 Remociones en masa reconocidas a partir del análisis de antecedentes

Se recopilaron y analizaron antecedentes sobre la ocurrencia de remociones en masa en la comuna de Lo Barnechea, considerando bibliografía, artículos de prensa y una entrevista con el encargado de emergencia (E.E.) Sr Edgardo Zenteno. Algunos de estos eventos han ocurrido fuera del área de estudio, en áreas aledañas dentro de la comuna de Lo Barnechea, pero se han incluido de manera referencial, con el fin de obtener información acerca de los factores que condicionan y gatillan la ocurrencia de estos fenómenos.

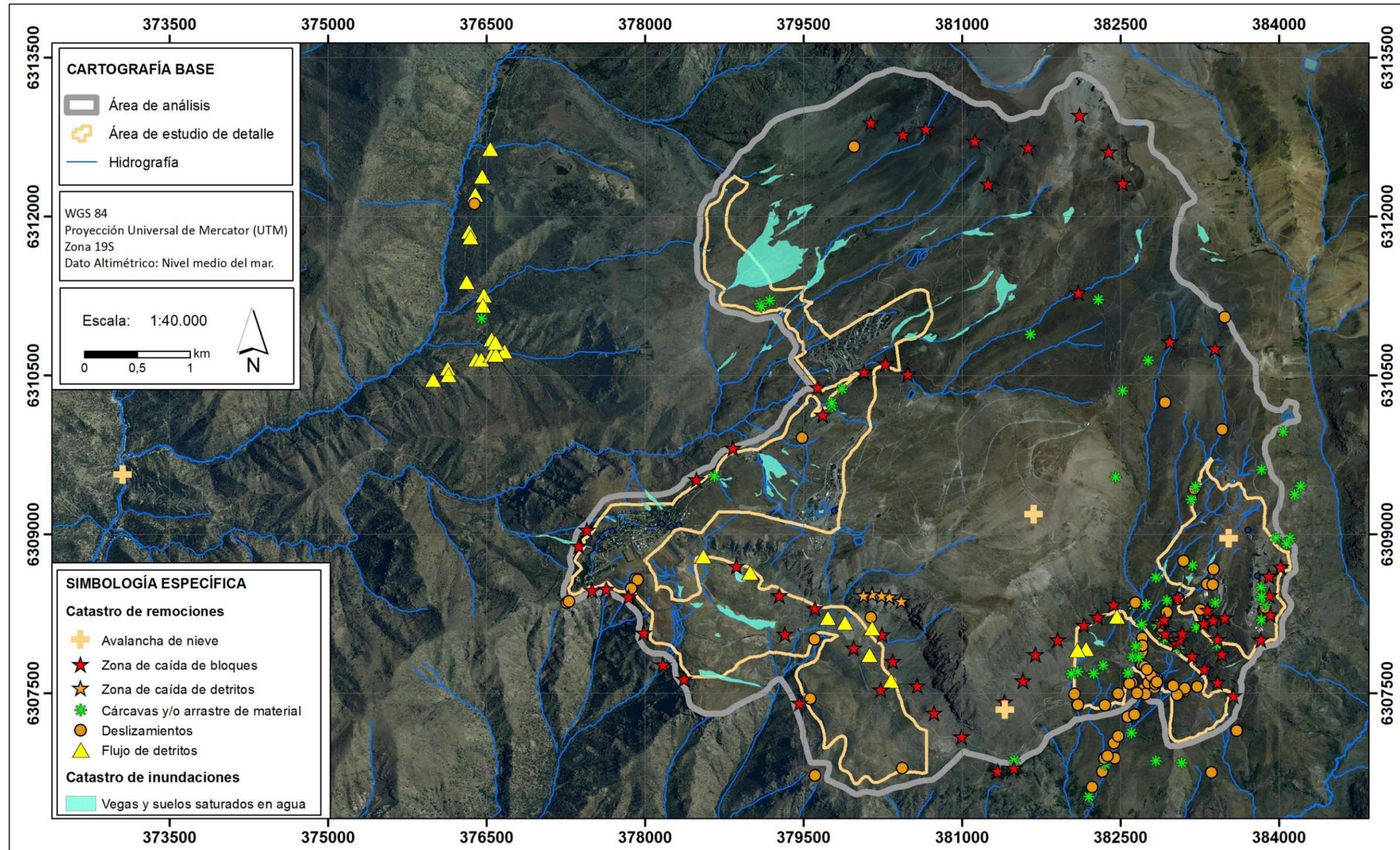
La información recopilada se resumen en el CUADRO N° 2-12. Dentro de los daños generados por los eventos recopilados se incluye la pérdida de vidas humanas, daños a rutas urbanas y cortes en el camino a Farellones (ruta G-21). De estos eventos, aquellos que cuentan con un mayor detalle descriptivo, y/o que se ubican en las cercanías de la zona de estudio, se reseñan a continuación.

CUADRO Nº 2-12 Eventos catastrados a partir de bibliografía, prensa y por entrevista con el encargado de emergencia.

Año	Fecha	Sector	Daños	Referencia revisada
-	-	Ruta G-21, km 5	Sector donde suelen reportarse caída de bloques sobre el camino.	Sr. Edgardo Zenteno
-	-	Ruta G-21, km 7 a 8	Sector de caída de bloques sobre el camino, y desbordes en los cruces de cauces.	Sr. Edgardo Zenteno
-	-	Ruta G-21, km 11,5 y 12	Sector donde suelen reportarse desbordes en los cruces de cauces.	Sr. Edgardo Zenteno
2013	29-Jun	Valle Nevado	"Deslizamiento de nieve" dejó una persona atrapada en sector de El Cepo e Valle Nevado	www.emol.com (consulta: 26/10/2015)
2012	17-Jun	Quebrada Cañaveral, km 4,5 ruta G-21	Aluvión cortó la ruta por varias horas, dejando personas aisladas y un camión atrapado	SERNAGEOMIN (2015)
2012	15 de Ene.	Santuario Yerba Loca, curva 15 camino a Farellones	Flujos detríticos y caídas de rocas Según el director metropolitano de la Onemi, Miguel Muñoz, "a las 16.00 horas comenzó a precipitar fuertemente en el sector. Al interior del santuario de Yerba Loca se producen tres deslizamientos, uno de ellos deja atrapados a 2 vehículos, sin daños para las personas. Al otro lado quedan aislados 30 vehículos, aproximadamente 70 personas entre adultos y niños".	www.la tercera.com (consulta: 28/08/2013) y Marín y Garrido (2012)
2009	08-Sept	Curva 1, ruta G-21, en Instalaciones de la división "Los bronceos" de Angloamerican.	Un segundo desprendimiento de tierra y barro se produjo a las 02.30 horas de hoy, dejando una persona muerta y al menos ocho heridos (Según encargado de emergencia, se trató de una avalancha de nieve en la garita de control). Con lo anterior, aumenta a tres la cantidad de fallecidos a raíz de los desprendimientos de tierra en Farellones.	www.emol.cl (consulta: 1/08/2013) y Sr. Edgardo Zenteno
2009	6 de Sept. (Síntesis del evento)	Quebradas Del Ñinhue, Huallalolén, Novillo Muerto, Seca y Nido de Águilas.	Desborde de las cuencas asociadas al cerro Pochoco. Desborde de la Quebrada Del Ñinhue, con resultado de 2 viviendas destruidas y 2 personas fallecidas; Desborde de la quebrada Huallalolén, con resultado de 4 viviendas destruidas; Desborde de la quebrada Novillo Muerto, con resultado de 5 viviendas destruidas.	INFRACON Y MLB (2014)
2009	24-Jul	Santa Teresa	Avalancha de nieve en sector de Santa Teresa dejó una persona fallecida	www.nevasport.com (consulta: 26/10/2015)
2009	23-Jul	El Colorado	"Alud"	El Mercurio
2000	Julio	Ruta G-21, km 2,2	Luego de intensas lluvias se produjo un deslizamiento de ladera, que dejó 8 m de material depositado sobre el camino. Se elaboró un plan de emergencia de transporte, y medidas de contención del talud. El camino permaneció cortado 1 semana y media.	Sr. Edgardo Zenteno
1998	Invierno	Ruta G-21, km 2,2	Deslizamiento de ladera. El camino permaneció cortado durante 4 días hábiles.	Sr. Edgardo Zenteno
1992	30-Ago	Camino a Farellones	Deslizamiento de sector de Farellones	El Mercurio
1941	Agosto	Camino a Farellones	Temporal dejó a esquiadores aislados en Farellones. Desbordes del río Mapocho. En el asentamiento minero Pérez Caldera un rodado mató a 8 personas	Urrutia & Lanza (1993)

Fuente: elaboración propia

FIGURA N° 2-64 Mapa catastro de peligros geológicos asociados a Procesos Exógenos, en el área de análisis y sus alrededores.



Fuente: Elaboración propia a partir de la recopilación bibliográfica, el análisis de fotografías aéreas, imágenes satelitales, observaciones en terreno y entrevista con el encargado de emergencia.

- Flujos de detritos y caídas de bloques de enero del 2012 en el parque Cordillera Yerba Loca (Marín & Garrido, 2012).

El día 15 de enero de 2012, un sistema frontal que afectó a la precordillera de la zona central de Chile, entre las 15.30 y las 17.00 horas, generó lluvias intensas, granizos y deshielos.

En el sector del parque Cordillera Yerba Loca, el agua caída alcanzó los 7,4 mm/hora y se gatillaron flujos detríticos y caídas de rocas. En un tramo de 4 km se produjeron alrededor de 15 pequeñas remociones en masa en las cabeceras de quebradas afluentes al río Yerba Loca, las que afectaron al camino interior del parque, siendo los flujos detríticos los de mayor recurrencia y los que generaron más daños. Los materiales removidos fueron principalmente lodo, rodados de tamaño intermedio, gravas finas y en algunos casos ramas y troncos. Estos fenómenos ocasionaron cortes de caminos y dejaron aislados a alrededor de 104 turistas que se encontraban en el parque (FIGURA N° 2-65).

FIGURA N° 2-65 Flujo de detritos que cortó el camino interior del parque Cordillera Yerba Loca.



Fuente: Marín y Garrido (2012)

- Desborde de cuencas del Cerro Pochoco y avalancha de nieve de septiembre de 2009, en el camino a Farellones (INFRACON y MLB, 2014).

Tras intensas precipitaciones, el día 06 de septiembre de 2009 se produjo el desborde de las cuencas asociadas al cerro Pochoco: desborde de la Quebrada Del Ñilhue, con resultado de 2 personas fallecidas y 2 viviendas destruidas; desborde de la quebrada Huallalolén, con resultado de 4 viviendas destruidas; desborde de la quebrada Novillo Muerto, con resultado de 5 viviendas destruidas.

El día 08 de septiembre del mismo año, se produjo una avalancha de nieve en la garita de la actual mina Los Bronces, resultando una persona muerta y al menos ocho heridos. La ubicación referencial (es decir, el desvío desde el camino a Farellones hacia a la mina) es la curva 1 del camino G-21.

De esta manera, fueron tres los fallecidos que dejó el temporal debido a la ocurrencia de remociones en masa en las cercanías de Farellones.

- Avalanchas de nieve de 2009 y 2013, en Valle Nevado y sector Santa Teresa, respectivamente (registro en prensa y E.E, ver CUADRO N° 2-12).

Según la información recopilada en prensa (www.emol.com), y corroborado por el encargado de emergencias (E.E.) de la municipalidad de Lo Barnechea, Sr. Sr. Edgardo Zenteno, en los últimos 6 años han ocurrido al menos dos avalanchas de nieve con impactos negativos sobre la población: el 29 de junio de 2013, en el sector El Cepo de Valle Nevado, una avalancha de nieve dejó atrapada a una persona, mientras que el 23 de julio del 2009, en el sector de Santa Teresa (entre el Colorado y Valle Nevado), una avalancha de nieve dejó 1 víctima fatal.

2.5.2.1.2 Remociones en masa registradas por el equipo consultor

Por su parte, el equipo consultor identificó otros eventos mediante el análisis de imágenes satelitales, fotos aéreas y observaciones directas de terreno, de los cuales se da una descripción general, con ejemplos ilustrativos de los eventos registrados. Dentro de los fenómenos identificados se incluyen caídas de bloques y de detritos, deslizamientos de roca y/o suelo, flujos de barro y/o detritos y el desarrollo de cárcavas y arrastre superficial de material de las laderas. Estos procesos se describen a continuación y su ubicación se presenta en la FIGURA N° 2-64.

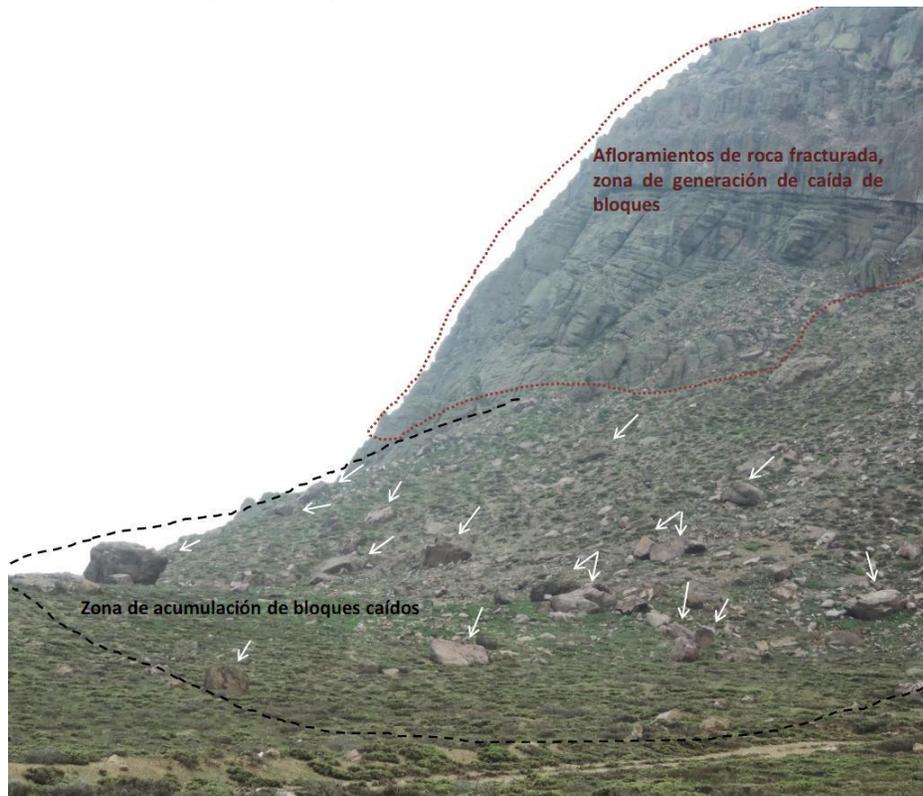
a) Caída de bloques y/o detritos

En el área de análisis se identificaron 75 puntos donde se observaron evidencias de caída de bloques y/o detritos. La mayoría se concentran en el sector ubicado entre Farellones y Valle Nevado.

Las caídas de bloques son las más comunes, se concentran al pie de taludes de alta pendiente compuestos por afloramientos de roca fracturada o estratificada (ver ejemplo en FIGURA N° 2-66). Algunos de los sectores que presentan caída de bloques se encuentran dentro de las zonas de estudio de detalle. Un ejemplo de esto ocurre en el camino entre Farellones y Valle Nevado (FIGURA N° 2-68 y FIGURA N° 2-69), donde se aprecian decenas de bloques con diámetros de hasta 5 m, y centenas de ejemplares con diámetros sobre 1 m. En el mismo sector, se aprecian bloques excepcionales de diámetro mayor a 15 m (ver ejemplo en FIGURA N° 2-67)

Por otro lado, las caídas de detritos consisten en la caída de una mezcla de fragmentos de roca (generalmente bloques menores a 2 m) y sedimentos de diversos tamaños, los que se acumulan en las laderas o al pie de éstas, formando morfologías cónicas (conos de detritos) (ver FIGURA N° 2-70 y FIGURA N° 2-71). En algunos casos, las zonas de generación de estos procesos coinciden con cicatrices y planos de ruptura de antiguos deslizamientos. Esto se debe a que los sectores de cicatrices y planos de ruptura suelen presentar zonas de altas pendientes y materiales inestables, los que van cayendo paulatinamente en forma de detritos, dando origen a estos procesos (ver FIGURA N° 2-71).

FIGURA N° 2-66 Ejemplo de bloques caídos en sector aledaño del camino a Valle Nevado



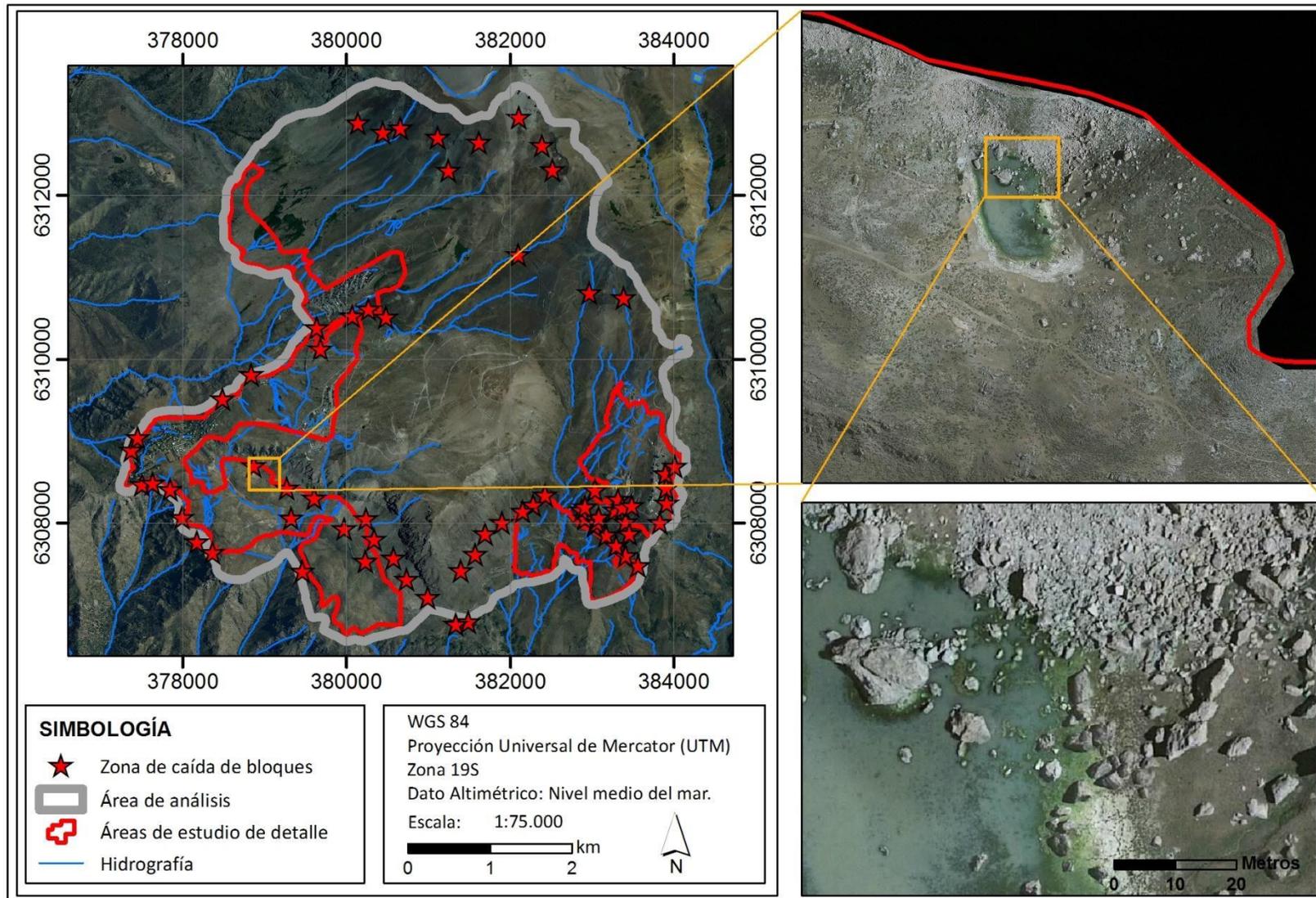
Fuente: Archivo fotográfico de terreno. Flechas blancas indican ubicación de los boques caídos de mayor tamaño (mayores a 2 m de diámetro)

FIGURA N° 2-67 Bloque caído de tamaño mayor a 15 m de diámetro, ubicado junto al camino a Valle Nevado



Fuente: Archivo fotográfico de terreno. Este bloque se conoce como "casa de piedra"

FIGURA N° 2-68 Ejemplo de caída de bloques entre Farellones y Valle Nevado. Bloques de más de 10 m de diámetro afectan el área de estudio de detalle. También se observa una zona de anegamiento, producto de un bajo topográfico del terreno.



Fuente: elaboración propia.

FIGURA N° 2-69 Fotografías de zona de caída de bloques entre Farellones y Valle Nevado. Bloques de hasta 5 m diámetro afectan el área de estudio de detalle.



Fuente: Archivo fotográfico de terreno.

FIGURA N° 2-70 Ejemplo de zonas de caída de detritos en laderas del sector ubicado entre Farellones y Valle Nevado



Fuente: Archivo fotográfico de terreno.

FIGURA N° 2-71 Ejemplo de zonas de caída de detritos en laderas del sector ubicado entre Farellones y Valle Nevado



Fuente: Archivo fotográfico de terreno. En este caso las zonas de generación corresponden a cicatrices y planos de ruptura de deslizamientos antiguos

b) Deslizamientos de roca y/o suelo

En el área de análisis se identificaron 68 deslizamientos. La mayor parte de ellos se concentra en el camino a Valle Nevado (ver FIGURA N° 2-73), afectando a los depósitos glaciares (FIGURA N° 2-74).

En la mayoría de los casos fue posible identificar la cicatriz de deslizamiento, pero en menos de la mitad de los deslizamientos inventariados (31 de 68) fue posible identificar tanto la cicatriz como el depósito asociado, o al menos una parte de éste (ver ejemplo en FIGURA N° 2-75). En general, esto se debe a que los deslizamientos se encuentran en laderas de valles y los materiales deslizados se depositan en torno a los cauces, quedando expuestos a la erosión fluvial.

Para aquellos deslizamientos en que fue posible identificar cicatriz y depósito asociado, se midieron los alcances o runouts (CUADRO N° 2-13). En general se trata de alcances de decenas de metros (promedio de 72 m), pero existen algunos deslizamientos de alcance mayor del orden de centenas de metros.

c) Flujos de barro y/o detritos

Dentro del área de análisis se catastraron 11 flujos de barro y/o detritos, los cuales se ubican en la parte sur del área de estudio, entre Farellones y Valle Nevado (FIGURA N° 2-76). Estos procesos se restringen al entorno de las quebradas del sector y en general, los abanicos aluviales asociados no abarcan grandes extensiones (presentan áreas menores a 0.05 km²). En la FIGURA N° 2-76 y FIGURA N° 2-77 se muestran ejemplos de estos procesos.

d) Cárcavas y arrastre superficial de materiales de ladera

Las cárcavas (rills en inglés) corresponden a formas erosivas que se presentan en forma de pequeños canales o valles intermitentes de muy poca profundidad (unos pocos centímetros) (Schaeztl & Anderson, 2005).

En el área de estudio, estos rasgos en general se desarrollan en laderas compuestas por materiales de escasa a nula consolidación como depósitos glaciares, depósitos coluviales y rellenos antrópicos. Estos procesos se presentan como pequeños surcos en las laderas, los que van generando una leve incisión y arrastre superficial de los materiales de la ladera. En la FIGURA N° 2-78 se presentan algunos ejemplos de estos procesos.

e) Avalanchas de nieve

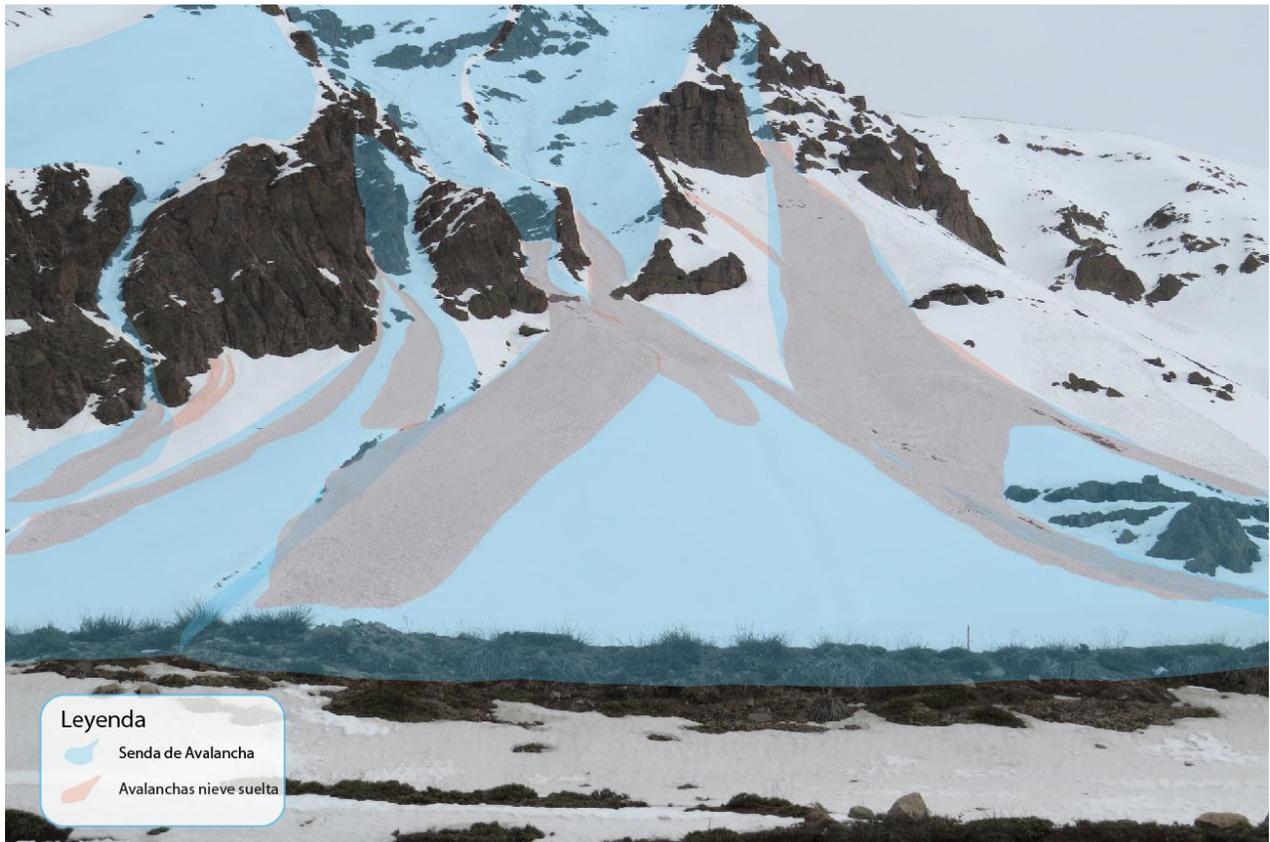
Durante el recorrido de terreno realizado el día 27 de octubre de 2015, se identificaron evidencias de pequeñas avalanchas de nieve en el camino a Valle Nevado. En la FIGURA N° 2-72 se muestran las sendas de avalanchas y pequeñas avalanchas de nieve suelta observadas. Estos procesos corresponden a avalanchas de pequeñas dimensiones, las que no alcanzan un desarrollo importante debido a que en este caso específico la zona de acumulación de nieve es pequeña

CUADRO N° 2-13 Alcances de deslizamientos en los que fue posible identificar las cicatrices y depósitos asociados

N° Identificador	Tipo	Alcance mínimo observado (m)
12	Deslizamiento de roca y/o suelo	85
13	Deslizamiento de roca y/o suelo	93
14	Deslizamiento de suelo	130
15	Deslizamiento de roca y/o suelo	724
17	Deslizamiento de roca y/o suelo	130
18	Deslizamiento de roca y/o suelo	18
20	Deslizamiento de roca y/o suelo	17
21	Deslizamiento de roca y/o suelo	22
22	Deslizamiento de roca y/o suelo	26
29	Deslizamiento de roca y/o suelo	35
30	Deslizamiento de roca y/o suelo	34
31	Deslizamiento de roca y/o suelo	46
32	Deslizamiento de roca y/o suelo	55
33	Deslizamiento de roca y/o suelo	90
37	Deslizamiento de roca y/o suelo	55
38	Deslizamiento de roca y/o suelo	28
39	Deslizamiento de roca y/o suelo	84
40	Deslizamiento de roca y/o suelo	46
43	Deslizamiento de roca y/o suelo	22
45	Deslizamiento de roca y/o suelo	20
47	Deslizamiento de roca y/o suelo	32
48	Deslizamiento de roca y/o suelo	50
50	Deslizamiento de roca y/o suelo	79
51	Deslizamiento de roca y/o suelo	29
52	Deslizamiento de roca y/o suelo	30
53	Deslizamiento de roca y/o suelo	19
54	Deslizamiento de roca y/o suelo	23
55	Deslizamiento de roca y/o suelo	38
56	Deslizamiento de roca y/o suelo	39
57	Deslizamiento de roca y/o suelo	112
58	Deslizamiento de roca y/o suelo	33

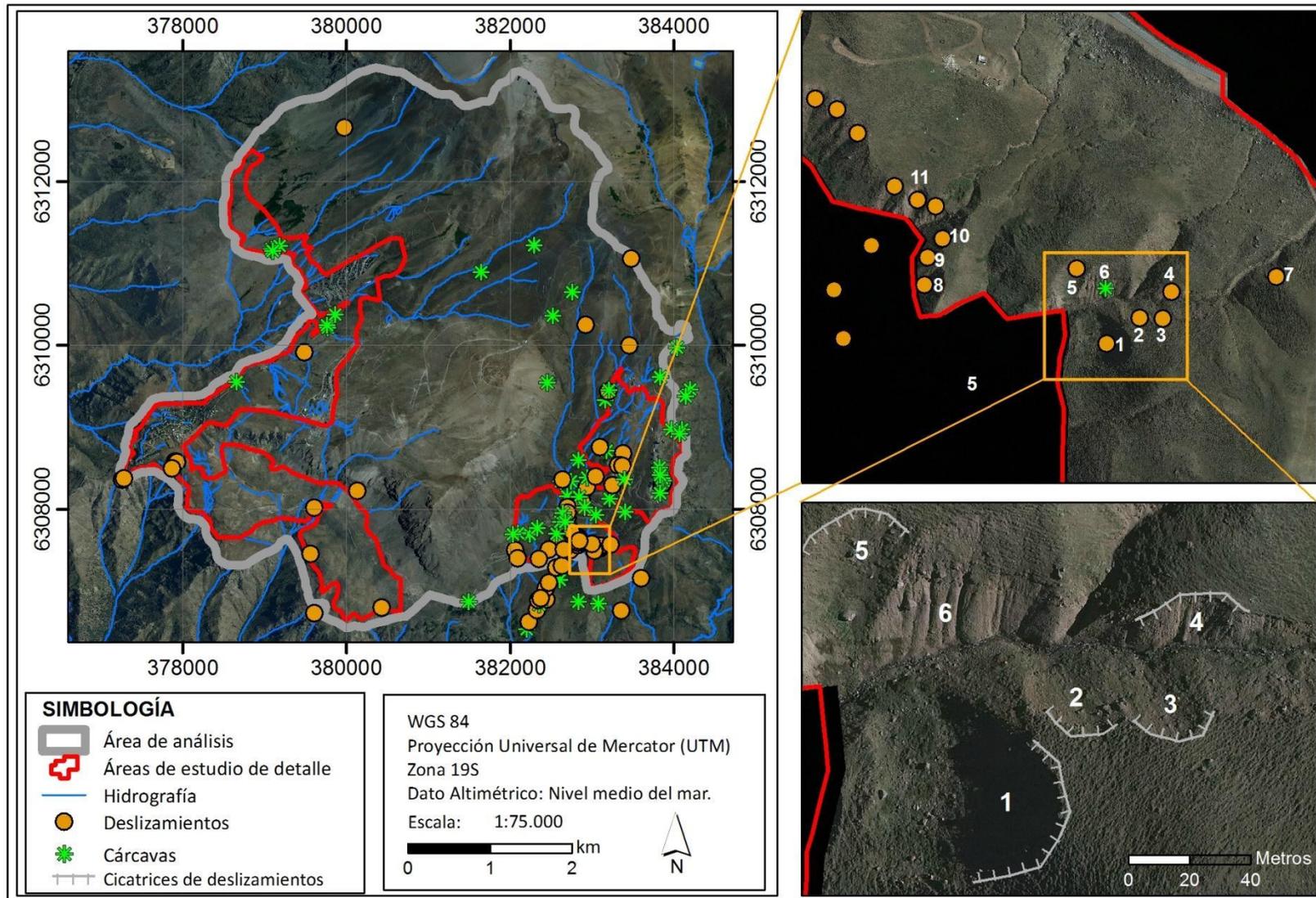
Fuente: Elaboración propia. Se destaca en color anaranjado y verde el valor máximo y mínimo, respectivamente.

FIGURA Nº 2-72 Ejemplos de pequeñas avalanchas de nieve en el camino a Valle Nevado



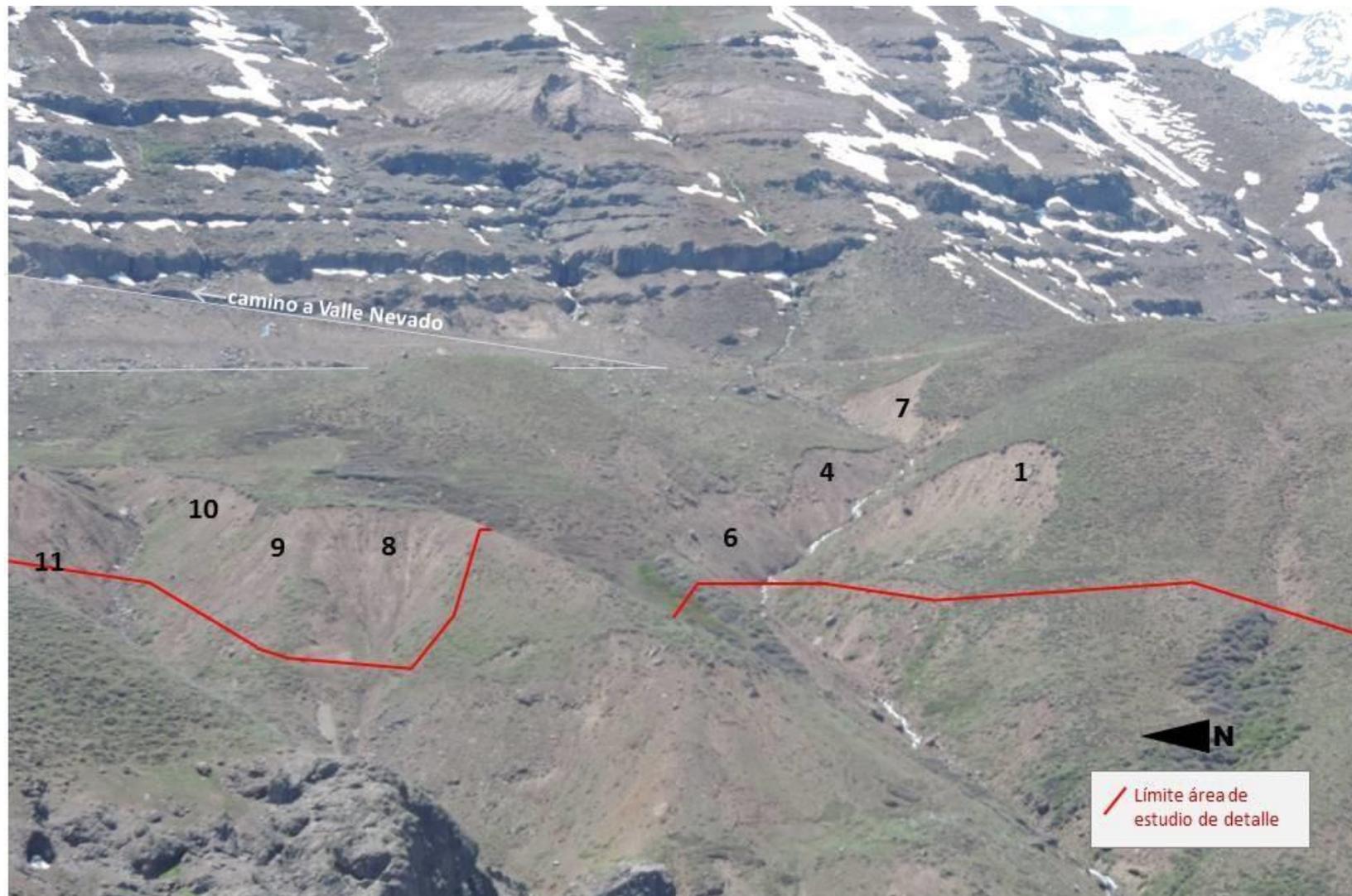
Fuente: Archivo fotográfico de terreno (fecha de la fotografía: 27/10/2015)

FIGURA Nº 2-73 Ejemplos de deslizamientos al sur de Valle Nevado (números 1 al 5), afectando la zona de estudio de detalle. También se observan cárcavas (número 6).



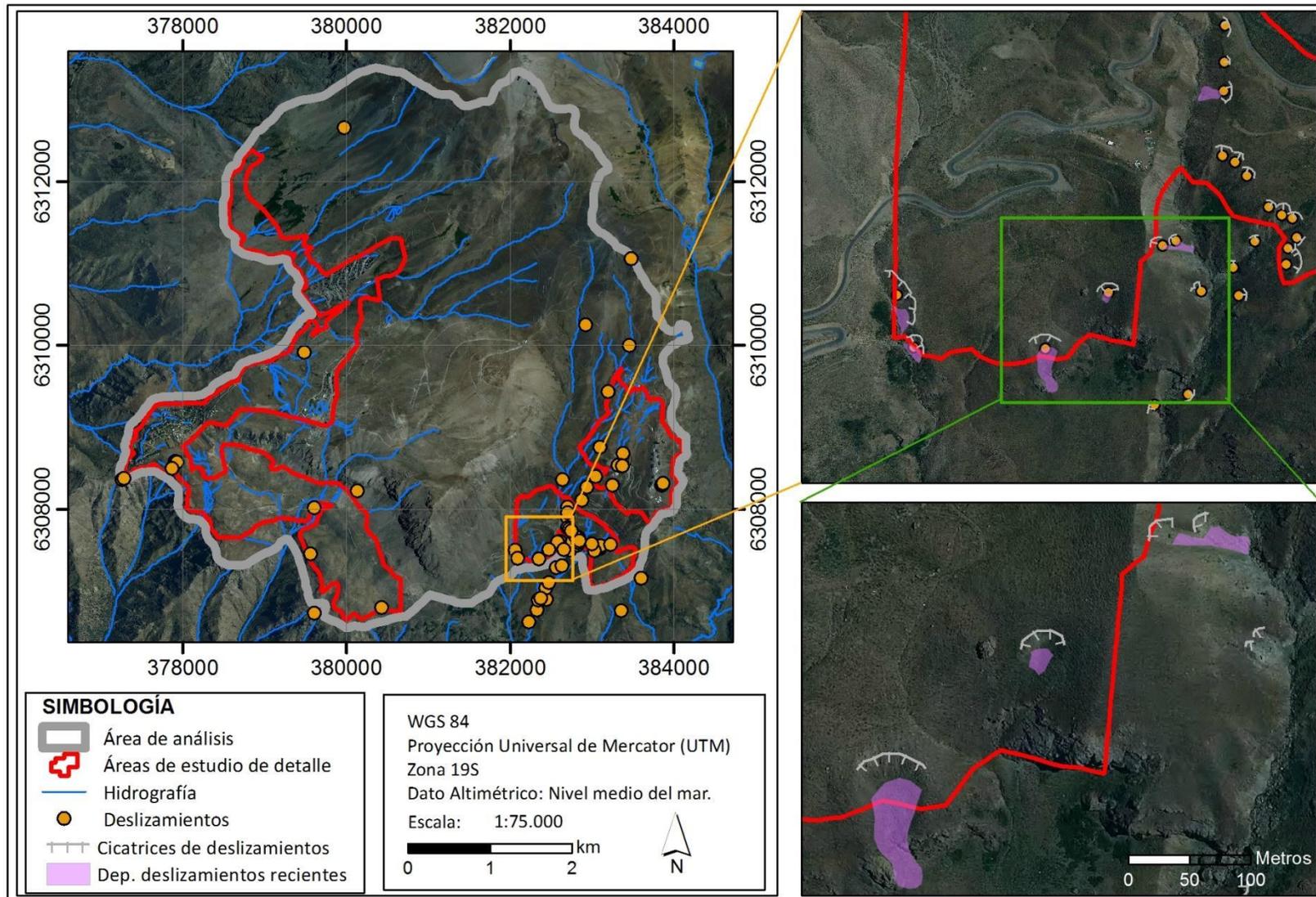
Fuente: elaboración propia.

FIGURA N° 2-74 Fotografía con deslizamientos al sur de Valle Nevado dentro la zona de estudio de detalle, afectando a depósitos glaciares.



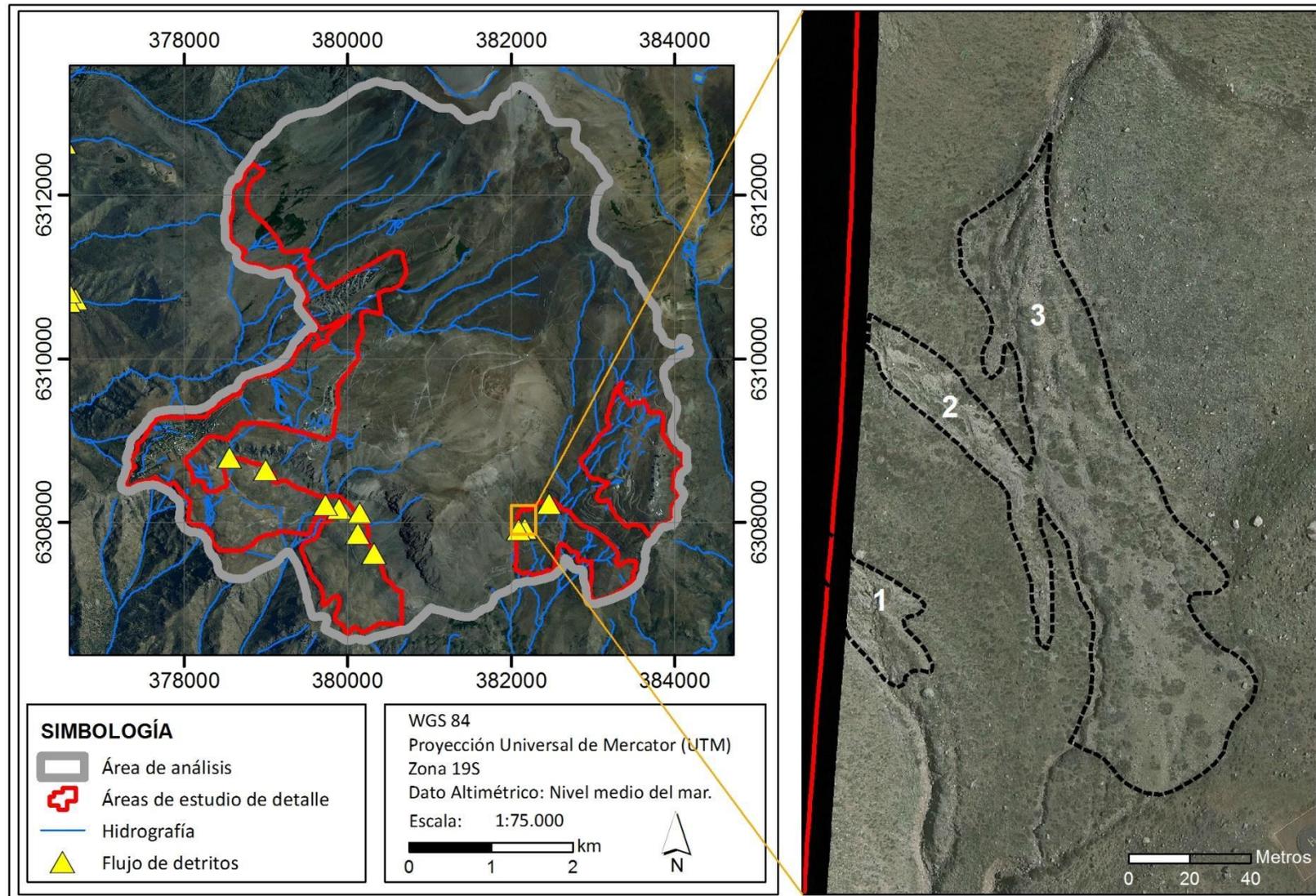
Fuente: Elaboración propia. En FIGURA N° 2-73 se muestra su ubicación en mapa

FIGURA N° 2-75 Ejemplos en el camino a Valle Nevado de deslizamientos, cicatrices y depósitos asociados.



Fuente: Elaboración propia

FIGURA N° 2-76 Ejemplo de flujo de detritos y/o barro al sur poniente de Valle Nevado (líneas segmentadas), afectando la zona de estudio de detalle. Se interpreta como la zona de derrame actual del abanico aluvial, que ha recolectado los últimos eventos aluvionales.



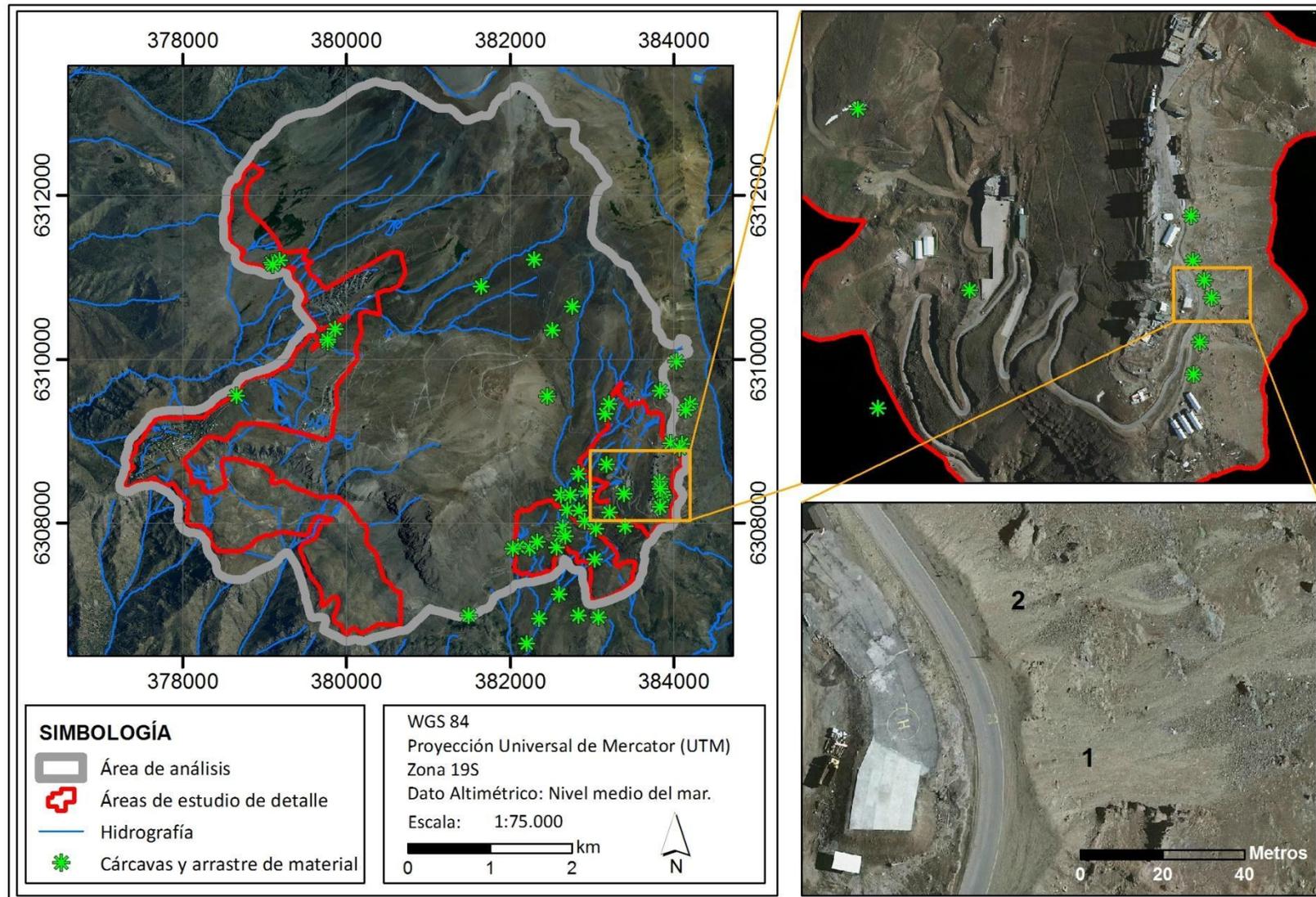
Fuente: Elaboración propia.

FIGURA N° 2-77 Fotografía de flujo de detritos al sur poniente de Valle Nevado, afectando la zona de estudio de detalle (líneas segmentadas). Se interpreta como la zona de derrame actual del abanico



Fuente: Elaboración propia. En FIGURA N° 2-76 se muestra su ubicación en mapa

FIGURA N° 2-78 Ejemplos de cárcavas y arrastre superficial de material producto de canales de baja jerarquía).



Fuente: Elaboración propia.

2.5.2.2 Catastro histórico de inundaciones

En visita a terreno del día 27 de octubre de 2015, en conjunto con el equipo de emergencia de la Municipalidad de Lo Barnechea, se constata que no existen antecedentes de inundaciones en la zona de estudio, esto principalmente porque gran parte del área a estudiar no se encuentra urbanizada.

A partir del análisis de imágenes satelitales, fotografías aéreas y observaciones de terreno, se identificaron cuerpos de agua, vegas y suelos saturados en agua, los cuales, de manera permanente o estacional, corresponden a zonas de anegamiento que no necesariamente se generan a partir de eventos extremos puntuales (FIGURA N° 2-81 y FIGURA N° 2-68).

En el sector de la vega de Manantiales, ubicado al noroeste de La Parva (FIGURA N° 2-81), se observaron suelos saturados con numerosos afloramientos de agua que generan pequeños escurrimientos superficiales (FIGURA N° 2-82). Además, en el mismo sector existen algunos escurrimientos sub-superficiales (profundidades de unos pocos centímetros bajo la superficie) que socavan el suelo, generando su colapso y posterior hundimiento, tal como se observa en el ejemplo de la FIGURA N° 2-79 y FIGURA N° 2-80.

FIGURA N° 2-79 Zona de colapso de suelos producidos por socavaciones asociadas a escurrimientos sub-superficiales en sector de vega de Manantiales



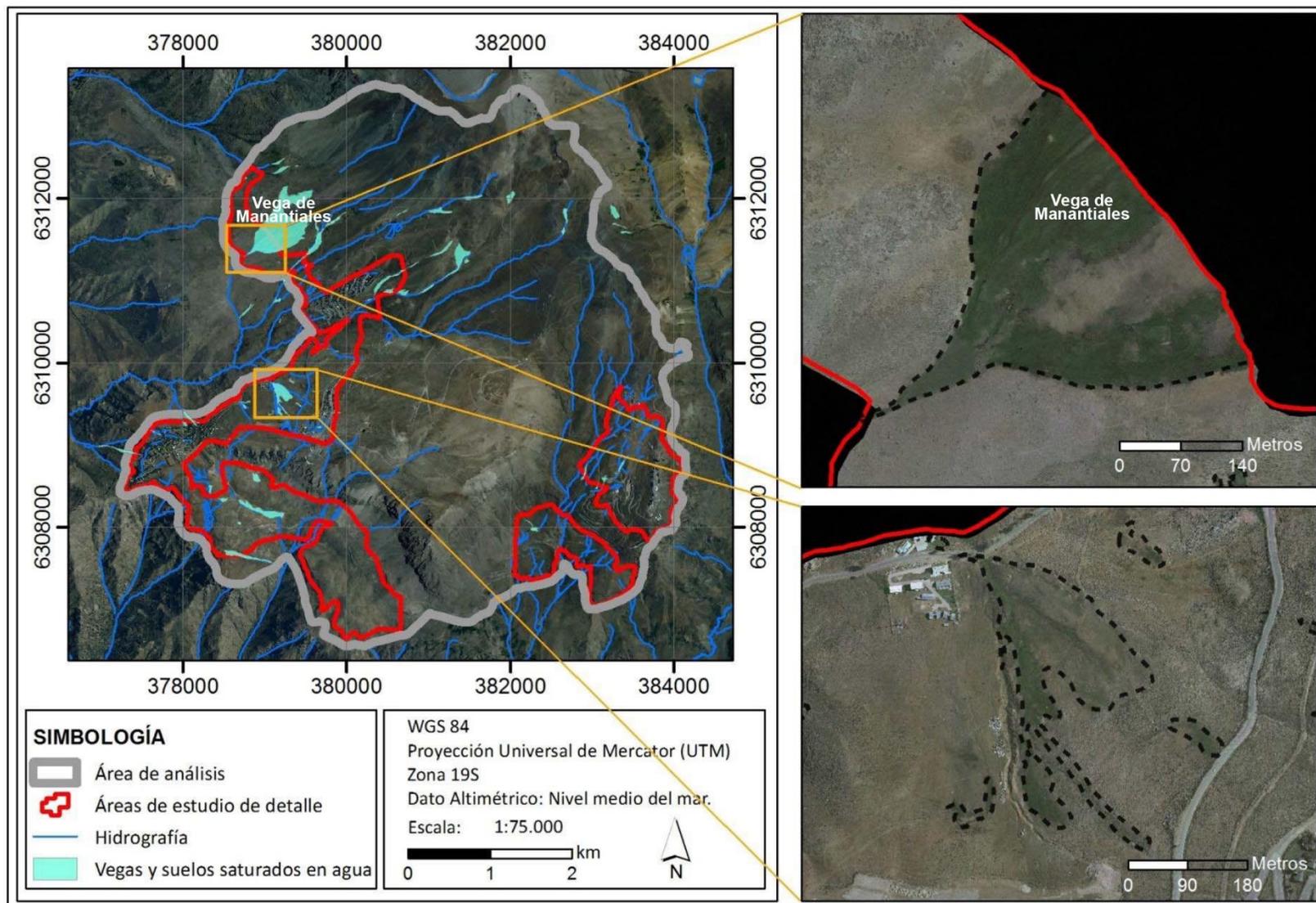
Fuente: Archivo fotográfico de terreno.

FIGURA N° 2-80 Ejemplo de socavones generados por escurrimientos sub-superficiales de agua en vega de Manantiales



Fuente: Archivo fotográfico de terreno.

FIGURA N° 2-81 Ejemplos de vegas y suelos saturados en agua (líneas segmentadas).



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA N° 2-82 Fotografías del sector de vega de Manantiales. A) Afloramientos de agua. B) Afloramientos de agua y suelos finos saturados en agua. C) Vista general



Fuente: Archivo fotográfico de terreno.

2.6 **Zonificación de susceptibilidad de los peligros geológicos que pueden afectar el área de estudio**

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

- Peligros No Zonificables: en los que no se pueden zonificar a escala urbana o que requerirían estudios de mayor detalle para poder determinar una zonificación de la susceptibilidad.
- Peligros Zonificables: casos en los que se puede categorizar la susceptibilidad y por lo tanto determinar una zonificación de la misma.

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

La metodología específica utilizada para el análisis de cada peligro geológico se describe en la Sección 2.2.6 “Zonificación de susceptibilidad de los peligros geológicos”

2.6.1 Peligros No Zonificables

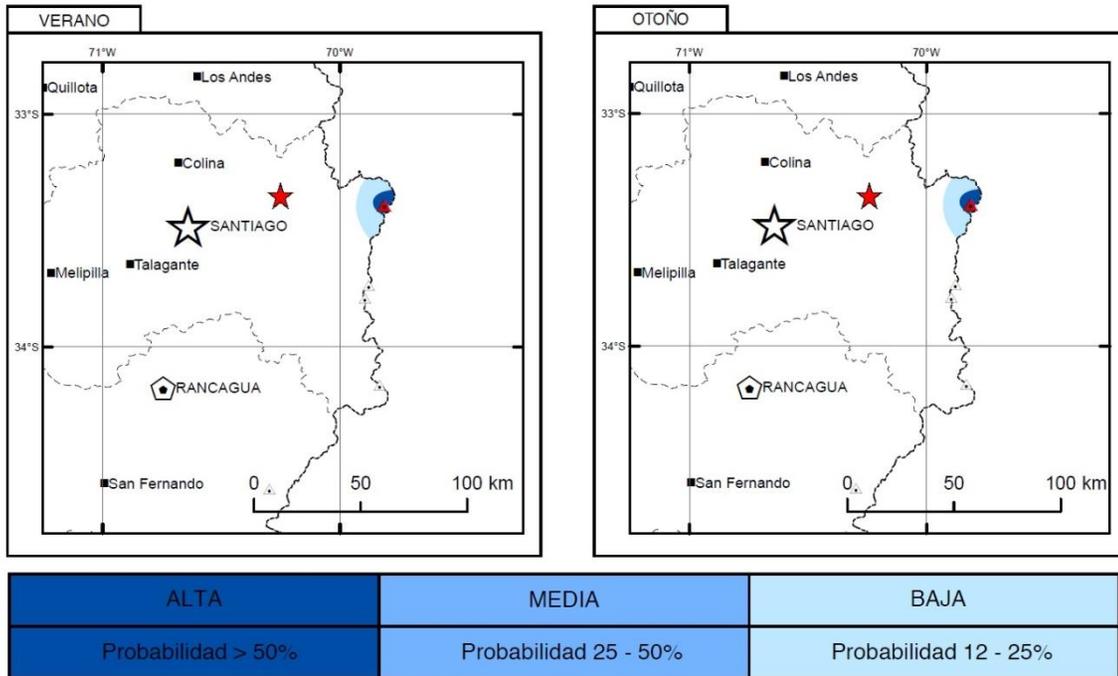
2.6.1.1 Peligro Volcánico

De acuerdo a lo explicado en el “Catastro de centros volcánicos y evidencias de actividad volcánica” (Sección 4.1.2.), los volcanes activos más próximos al área de estudio son: Tupungatito, San José y Maipo. El análisis de los peligros volcánicos que pueden afectar al área de análisis, como consecuencia de un proceso eruptivo, se realizó basándose en el mapa de peligros volcánicos del Volcán Tupungatito (Silva & Bertin, 2012) y en el mapa de peligros volcánicos de los tres centros eruptivos (Orozco, et al., 2013), ambos elaborados por el SERNAGEOMIN.

Considerando el modelo de dispersión atmosférica de material piroclástico que evalúa la acumulación de al menos 1 cm de este material por estaciones para el volcán Tupungatito (el más cercano al área de análisis: 40 km de distancia en línea recta aproximadamente) (Silva & Bertin, 2012), se concluye que el área de análisis no se encuentra expuesta a erupciones de material piroclástico ante un escenario esperable (Índice de explosividad = 2 a 3; Altura de columna = 10 km) (FIGURA N° 2-83).

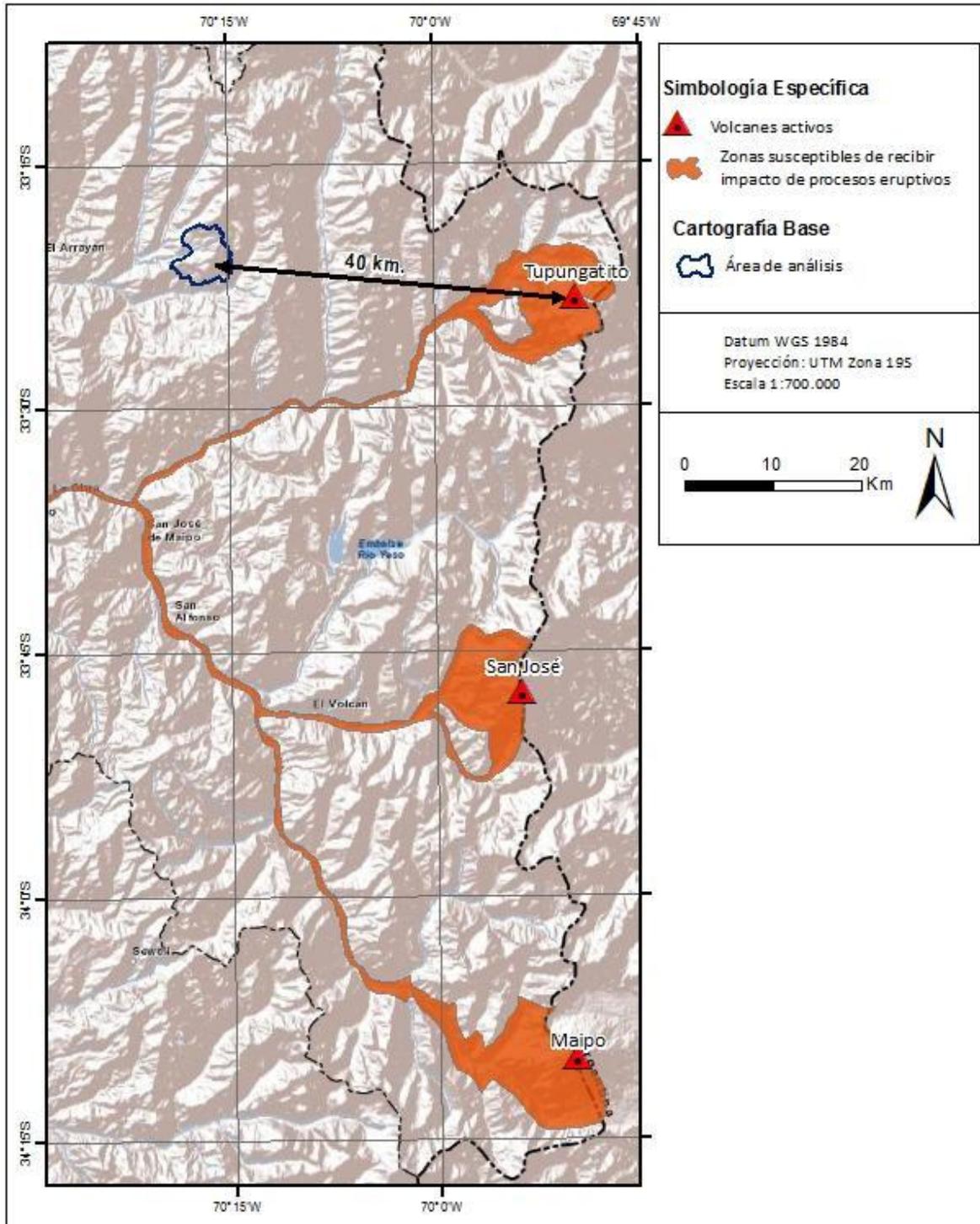
Según la zonificación de susceptibilidad realizada por Orozco et al. (2013), el área de análisis (y por ende, las áreas de estudio de detalle) no se encuentra en una zona susceptible de recibir impacto de procesos eruptivos asociados a los tres volcanes activos de la región (FIGURA N° 2-84), es decir, el área de análisis no está expuesta a flujos de lava, proyecciones balísticas, corrientes piroclásticas, avalanchas de detritos volcánicos o inundaciones laháricas.

FIGURA N° 2-83 Dispersión atmosférica durante verano y otoño. Se representa la acumulación de al menos 1 cm de material piroclástico para un escenario esperable (Índice de explosividad = 2 a 3; Altura de columna = 10 km). La estrella de color rojo indica la ubicación aproximada del área de análisis.



Fuente: Modificado de Silva y Bertin (2012)

FIGURA N° 2-84 Zonificación de susceptibilidad de peligros volcánicos asociados a los volcanes Tupungatito, San José y Maipo.



Fuente: Elaboración propia a partir de Orozco et al. (2013).

2.6.1.2 Peligro Sísmico

2.6.1.2.1 Caracterización de la sismicidad local

Considerando lo señalado en el capítulo 2.5.1.1 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.

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.

En la Cordillera Principal de Chile Central, a la latitud del área de análisis, se registra una importante actividad sísmica cortical que espacialmente se asocia a la Falla San Ramón, una falla ubicada a lo largo del río Olivares y a un área cercana al volcán San José (Barrientos, et al., 2004).

Por otro lado, investigaciones recientes realizadas al oriente de Santiago han determinado que la Falla San Ramón es una falla activa que potencialmente puede generar sismos superficiales de magnitud cercana a $M_w=7.2$ (Rauld, 2002; Armijo, et al., 2010; Rauld, 2011; Pérez et al., 2013). Si bien siguen en curso una serie de investigaciones para determinar el grado de actividad de la falla, su comportamiento sísmico y la data de sus últimos movimientos con ruptura superficial. Con el grado de conocimiento actual es posible determinar para la falla un período de recurrencia del orden de 10.000 años para sus sismos mayores, pero dado que no se conoce con exactitud su comportamiento e historia sísmica, no es posible cuantificar el grado de acumulación de deformación actual en la falla.

Los sismos superficiales son muy destructivos en las cercanías a la zona epicentral (distancia aproximadamente los 4 km), y se alcanzan aceleraciones que pueden superar 1g debido a las interacciones de las ondas sísmicas en superficie (hasta distancias respecto a la falla de unos 2 km aproximadamente), pero su intensidad se atenúa rápidamente con la distancia. Por lo anterior se considera que una parte mayor de la comuna podría ser afectada en caso de un sismo producido en la falla San Ramón, o en alguna falla del sistema de frente cordillerano occidental.

2.6.1.2.2 Microzonificación sísmica

Para el área de análisis, se determinó la respuesta sísmica (o respuesta de sitio) cualitativa de las unidades identificadas en el levantamiento geológico-geomorfológico (sección 2.3.2), a partir de las características de estas unidades y su comparación con resultados de trabajos científicos (Allen & Wald, 2007; Wald & Allen, 2007; Wills & Clahan, 2006) es posible determinar una respuesta sísmica asociada a cada una de las unidades.

ANEXO C Depósitos fluvio-aluviales

Estos depósitos sedimentarios se caracterizan por no presentar consolidación, ya que son sedimentos activos. Dado su escaso espesor en la zona no forman terrazas ni morfologías importantes. Por lo anterior se considera que a pesar de presentar características propias de materiales con mala respuesta esperada, el hecho que formen una cobertura delgada implica que su respuesta sísmica depende de los materiales que conformen la unidad geológica inferior.

ANEXO D Depósitos aluviales

De la misma forma que los depósitos fluvio-aluviales, estos depósitos conforman una cobertura de poco espesor, no consolidada de depósitos activos, por si esta unidad presenta características propias de material con mala respuesta de sitio, pero su espesor no permite considerar estos materiales como suelo de fundación por sí mismos, y la respuesta del área donde se ubican depende de la unidad geológica inferior.

ANEXO E Depósitos coluviales

Los depósitos coluviales pueden formar una cobertura un poco más gruesa que las dos unidades anteriores, estos depósitos pueden presentar mala respuesta de sitio, al ser materiales muy poco consolidados, de granulometría heterogénea y cerca de una condición de equilibrio metaestable.

ANEXO F Depósitos lacustres, vegas y cuerpos de agua

Dado que estos materiales son granulometría fina y se encuentran saturados en agua, la velocidad de propagación de las ondas de corte será muy baja, lo que resulta en amplificación de las ondas. Esto implica que su respuesta sísmica se considera muy mala.

ANEXO G Depósitos glaciares

Estos son depósitos no consolidados de granulometría heterogénea, que presentan una matriz limo arcillosa, con cierto grado de saturación de agua. Esto indica que la velocidad de propagación de las ondas de corte puede variar mucho dependiendo del grado de saturación de los materiales, se considera en general material de mala respuesta sísmica.

ANEXO H Glaciar de roca intacto

En general la respuesta sísmica de los glaciares de roca no ha sido estudiada, dado que estos cuerpos presentan una serie de condiciones muy variables y que por su naturaleza no se consideran cuerpos sobre los que se podría realizar edificación. En general son cuerpos de dinámicas internas complejas que no se consideran adecuadas para su utilización en forma permanente.

ANEXO I Deslizamientos recientes

Son depósitos inestables y no consolidados, que pudiesen reactivarse. Por lo anterior se considera un muy mal suelo de fundación.

ANEXO J Deslizamientos antiguos

Son depósitos inestables y no consolidados, que pudiesen reactivarse. Por lo anterior se considera un muy mal suelo de fundación.

ANEXO K Afloramientos de roca

La roca como material consolidado se considera el mejor suelo de fundación, dado que presenta valores de velocidad de onda de corta altos, y por lo tanto poca amplificación de las ondas sísmicas.

ANEXO L Sapolito

Esta es una cobertura de poco espesor que por definición se ubica sobre unidades de roca, se considera como unidad de poco espesor no será ocupada como suelo de fundación, siendo la roca subyacente material de buena respuesta sísmica.

ANEXO M Depósitos antrópicos

En general se consideran muy malos suelos de fundación, salvo que hayan sido especialmente tratados y compactados según cálculos de ingeniería para realizar fundaciones.

ANEXO N Resultados de la respuesta de sitio

Según las características de las unidades geológicas antes presentadas, se estableció una categorización de respuesta de sitio para cada una de ellas, la cual se presenta en el CUADRO N° 2-14. Esta categorización discrimina 3 niveles cualitativos de respuesta: Muy Buena, Regular / Mala, Muy Mala. En los sectores donde el espesor estimado de las unidades geológicas fuera muy delgado como para afectar la respuesta de sitio, se consideró la unidad geológica subyacente.

Adicionalmente, y a modo referencial, se presentan estos resultados de manera gráfica en la FIGURA N° 2-85.

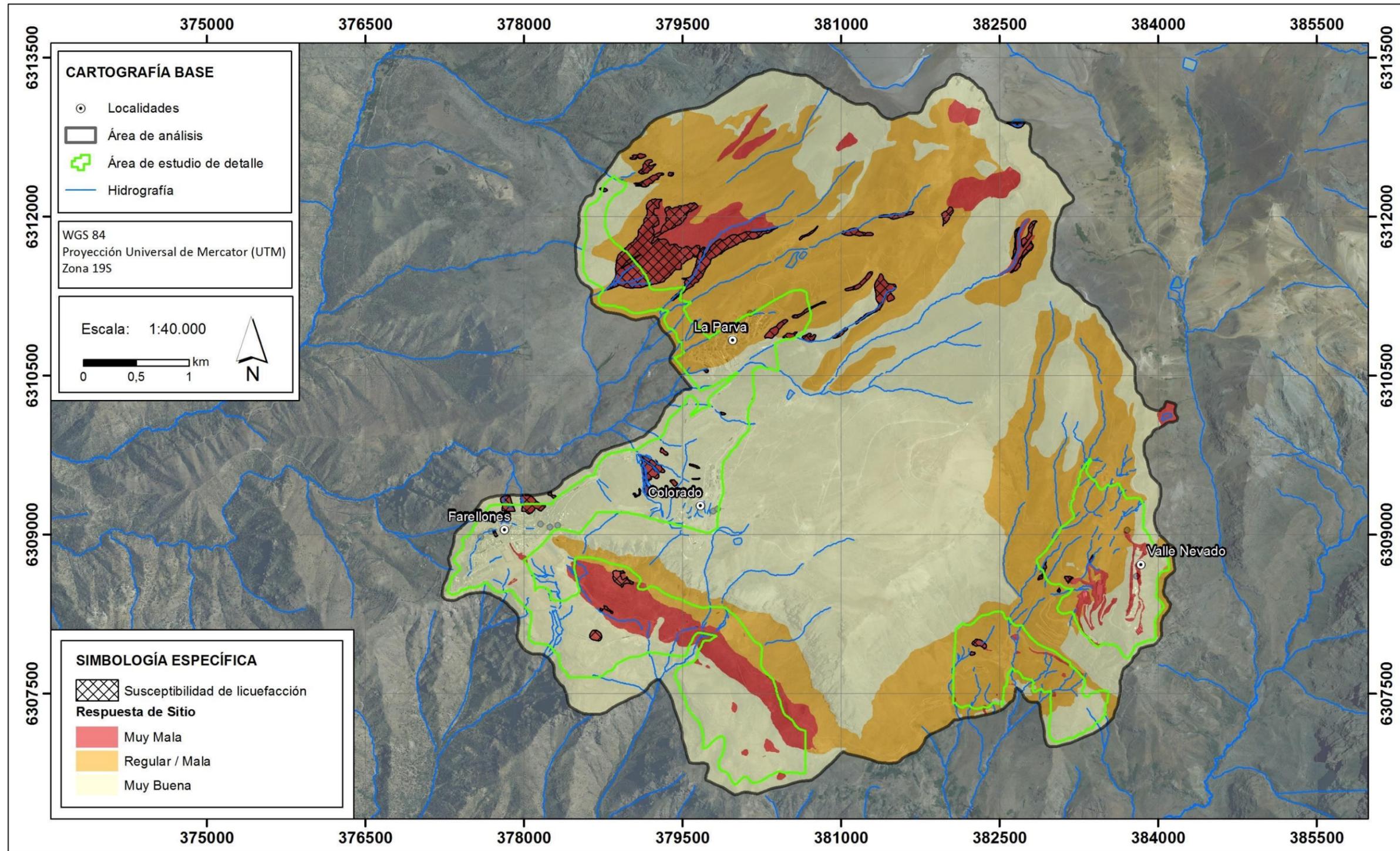
Debido a que el espesor de las unidades geológicas es variable, y debido a que este influye directamente en la respuesta de sitio, se recomienda estudiar más detalladamente la distribución de tales espesores, con el fin de determinar una respuesta de sitio más precisa.

CUADRO N° 2-14 Respuesta de sitio según cada unidad geológica

Unidad geológica	Respuesta de sitio
Depósitos fluvio-aluviales	Depende de la unidad subyacente
Depósitos aluviales	Depende de la unidad subyacente
Depósitos coluviales	Regular / Mala
Depósitos lacustres, vegas y c.a.	Muy Mala
Depósitos glaciares	Regular / Mala
Glaciares de roca	Muy Mala
Deslizamientos recientes	Muy Mala
Deslizamientos antiguos	Muy Mala
Afloramientos de roca	Muy Buena
Saprolito	Muy Buena
Depósitos antrópicos	Muy Mala

Fuente: Elaboración propia.

FIGURA N° 2-85 Respuesta de sitio y susceptibilidad de licuefacción para el área de análisis.



Fuente: Elaboración propia.

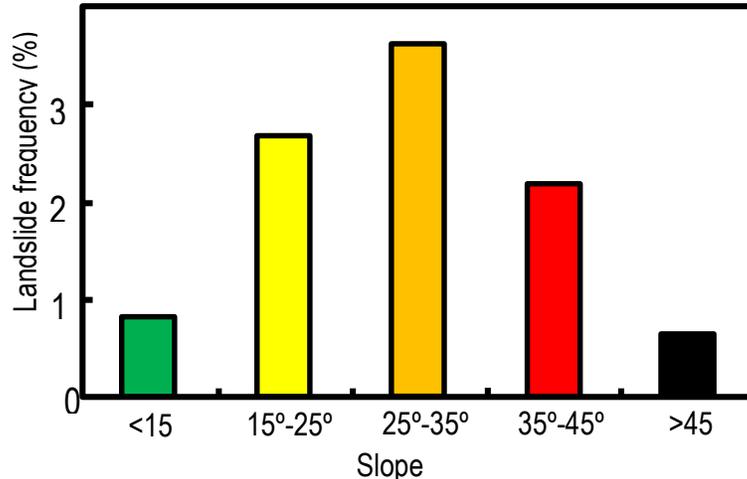
2.6.2 Peligros Zonificables

2.6.2.1 Peligro de Remociones en Masa

2.6.2.1.1 Deslizamientos

Las remociones en masa en general, y en particular los deslizamientos, se desencadenan en zonas donde ya existen condicionantes para su ocurrencia. En este sentido, la geología, entendida como el tipo de material que conforma una ladera, ejerce un control de primer orden en la ocurrencia de los mismos, ya que un material no consolidado, por ejemplo, mostrará una propensión mayor a moverse respecto de un macizo de roca fresca con la misma pendiente. Por su parte, existen catastros de deslizamientos realizados en distintos lugares del mundo (e.g. Esaki et al. (2005), Giraud & Shaw (2007)), los cuales indican que la mayor frecuencia de deslizamientos se observa sobre pendientes de 25° a 35° de inclinación (FIGURA N° 2-86).

FIGURA N° 2-86 Frecuencia de deslizamientos en función de la pendiente del terreno



Fuente: Esaki et al. (2005).

Tomando en consideración el control que ejercen estos 2 factores, González de Vallejo (2002) propone una integración de ambos componentes (tipo de material y pendiente) para generar una clasificación preliminar del grado de estabilidad del terreno. Esta clasificación se ve favorecida si se cuenta con catastros detallados de eventos de deslizamientos anteriores, ya que estos permiten calibrar con datos locales qué unidades geológicas y sobre laderas de qué pendientes debieran esperarse nuevos deslizamientos.

Adicionalmente, el factor de la exposición de la ladera (orientación) puede ejercer un control importante, en caso de que esta determine sus condiciones de humedad. Una ladera húmeda, reduce la resistencia al corte de los materiales, y por tanto favorece la ocurrencia de deslizamientos.

La vegetación presente en las laderas, si bien teóricamente ejerce un control ya que estabiliza los materiales sobre los que se desarrolla, en el área de análisis se observa como una fina cobertura localizada que no alcanza a generar efectos importantes de estabilización.

Por último, el grado de meteorización del material, que también podría ser considerado como un factor de importancia, requiere de un análisis detallado que se escapa a los alcances de este estudio. Sin

embargo, de manera general, los efectos que dicho grado de meteorización tiene sobre la ocurrencia de deslizamientos, pueden ser considerados como incluidos dentro de la caracterización de las unidades geológicas.

Una vez analizada la distribución de los deslizamientos en el área de estudio, se constató que los factores que condicionan su ocurrencia corresponden a la litología (unidades geológicas), pendiente y exposición.

ANEXO O Susceptibilidad de generación de deslizamientos

Para determinar cuánto es lo que “pesa” cada factor condicionante en la generación de deslizamientos, se utilizó el Método Peso de la Evidencia (ver ANEXO XX). Este es un método cuantitativo, basado en el Teorema de Bayes de probabilidad condicional (Bonham & Carter, 1994), que asigna un peso a cada factor condicionante considerado que pueda incidir en la generación de una remoción en masa. El cálculo de este peso se basa en la probabilidad *a posteriori* de que ocurra una remoción en masa, dada la presencia de uno o más predictores binarios (factores condicionantes). El cálculo se realiza a partir del mapa inventario de deslizamientos, y de los mapas de predictores o factores condicionantes (extraídos de la línea base geológica y geomorfológica). Luego, con base en la relación espacial entre los distintos tipos de mapas, se calculan las probabilidades antes mencionadas.

Para el caso de estudio, cada uno de los 3 factores condicionantes (es decir, litología, pendiente y exposición) fue representado espacialmente a través de archivos tipo raster, los que contienen una grilla de píxeles con los valores de los datos respectivos. Para su análisis estadístico, los valores de estos mapas fueron clasificados en clases, las que fueron definidas según la distribución de los valores analizados (CUADRO N° 2-15). Los archivos rasters utilizados tienen un tamaño de píxel de 5 x 5 m.

CUADRO N° 2-15 Clases utilizadas para cada factor condicionante.

	Pendiente (°)	Unidad geológica	Exposición
Clases	0-15	Afloramientos de roca	Norte
		Antrópico	Noreste
	15-25	Depósitos coluviales	Este
		Depósitos glaciares	Sureste
	25-35	Deslizamientos antiguos	Sur
		Saprolito	Suroeste
	>35	Otras unidades	Oeste
			Noroeste

Fuente: Elaboración propia. Estos 3 factores condicionantes fueron considerados en el análisis estadístico del Método de Peso de la Evidencia, que sirvió para determinar las zonas de generación de deslizamientos.

Para calcular el peso asociado a cada clase de cada factor condicionante, fue necesario conocer el número de píxeles por clase y, dentro de cada clase, el número de píxeles con ocurrencia de deslizamientos y sin ellas. Con estos datos se calcularon los pesos y los contrastes en cada caso (CUADRO N° 2-17).

Una vez que se tuvo los pesos y contrastes para cada caso considerado, se calculó el Índice de Susceptibilidad de ocurrencia de deslizamientos (ISD), de acuerdo a la siguiente expresión:

$$ISD = \sum_i C_i$$

donde C_i representa el valor del contraste en cada caso. Este cálculo se realizó para cada píxel de las áreas estudiadas, con lo que se obtuvo un archivo raster con los valores de ISD para cada píxel considerado en el análisis. Finalmente, estos datos fueron agrupados según rangos de valores, de tal

manera que la distribución espacial de tales rangos tuviera consistencia con las observaciones del equipo consultor, y con el hecho de que, en general, un $ISD > 2$ se considera importante estadísticamente (Lee, et al., 2002). Los rangos de ISD con sus respectivos grados de susceptibilidad se presentan en el CUADRO N° 2-16

CUADRO N° 2-16 Susceptibilidad de generación de deslizamientos según rangos de ISD

ISD	Susceptibilidad
-3,79 - -0,93	-
-0,93 - 0,34	Moderada
0,34 - 1,42	Alta
> 1,42	Muy Alta

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO N° 2-17 Cálculo de pesos y contrastes para cada clase de los factores condicionantes considerados para aplicar el Método Peso de la Evidencia.

		Píxeles con Deslizamiento		Píxeles sin Deslizamiento								
	Tot.Pix.Clase	En Clase	Otras Clases	En Clase	Otras Clases							
Pendientes	B	N(BnD)	N(B*nd)	N(BnD*)	N(B*nd*)	P(B D)	P(B D*)	P(B* D)	P(B* D*)	W+	W-	C
0-15	376953	0	73	376953	880811	0%	30%	100%	70%	-0,97	0,36	-1,33
15-25	499860	11	62	499849	757915	15%	40%	85%	60%	-0,97	0,34	-1,31
25-35	277531	25	48	277506	980258	34%	22%	66%	78%	0,44	-0,17	0,61
>35	103493	37	36	103456	1154308	51%	8%	49%	92%	1,82	-0,62	2,44
Total	1257837	73	73	1257764	1257764	1	1	1	1			

		Píxeles con Deslizamiento		Píxeles sin Deslizamiento								
	Tot.Pix.Clase	En Clase	Otras Clases	En Clase	Otras Clases							
Litología	B	N(BnD)	N(B*nd)	N(BnD*)	N(B*nd*)	P(B D)	P(B D*)	P(B* D)	P(B* D*)	W+	W-	C
Afloramientos de roca	149829	12	61	149817	1107838	16%	12%	84%	88%	0,32	-0,05	0,37
Saprolito	475648	9	64	475639	782016	12%	38%	88%	62%	-1,12	0,34	-1,46
Depósitos glaciares	298736	40	33	298696	958959	55%	24%	45%	76%	0,84	-0,52	1,36
Depósitos coluviales	152056	4	69	152052	1105603	5%	12%	95%	88%	-0,79	0,07	-0,86
Deslizamientos antiguos	23224	1	72	23223	1234432	1%	2%	99%	98%	-0,30	0,00	-0,30
Antrópico	10258	7	66	10251	1247404	10%	1%	90%	99%	2,47	-0,09	2,56
Otras	147977	0	73	147977	1109678	0%	12%	100%	88%	-1,12	0,13	-1,25
Total	1257728	73	73	1257655	1257655	1	1	1	1			

		Píxeles con Deslizamiento		Píxeles sin Deslizamiento								
	Tot.Pix.Clase	En Clase	Otras Clases	En Clase	Otras Clases							
Exposición	B	N(BnD)	N(B*nd)	N(BnD*)	N(B*nd*)	P(B D)	P(B D*)	P(B* D)	P(B* D*)	W+	W-	C
Norte	34223	0	73	34223	1223541	0%	3%	100%	97%	-0,98	0,03	-1,00

Noreste	12055	0	73	12055	1245709	0%	1%	100%	99%	-0,98	0,01	-0,99
Este	45738	1	72	45737	1212027	1%	4%	99%	96%	-0,98	0,02	-1,00
Sureste	144248	9	64	144239	1113525	12%	11%	88%	89%	0,07	-0,01	0,08
Sur	251544	17	56	251527	1006237	23%	20%	77%	80%	0,15	-0,04	0,19
Suroeste	364071	25	48	364046	893718	34%	29%	66%	71%	0,17	-0,08	0,25
Oeste	271016	17	56	270999	986765	23%	22%	77%	78%	0,08	-0,02	0,10
Noroeste	134942	4	69	134938	1122826	5%	11%	95%	89%	-0,67	0,06	-0,73
Total	1257837	73	73	1257764	1257764	1	1	1	1			

Fuente: Elaboración propia. B y B* representan el número de píxeles en la clase y fuera de la clase, respectivamente. D y D* representan los píxeles con y sin deslizamientos, respectivamente. BnD indica intersección entre ambas condiciones y P(B|D) la probabilidad condicional de que ocurra B dada la condición D.

ANEXO P Susceptibilidad de alcance de deslizamientos

Tal como se indica en el catastro de peligro geológicos (ver sección 2.5.2.1), los deslizamientos que exhiben tanto la cicatriz de ruptura como el depósito, muestran alcances de decenas de metros (promedio de 72 m), con excepciones del orden de centenas de metros. La gran mayoría de estos deslizamientos caen hacia el fondo de quebradas encajonadas. Sin embargo, los deslizamientos con alcances mayores se ubican en acantilados de grandes diferencias de cotas y sin encajonamientos. Esto indica que los alcances muestran una dependencia del contexto geomorfológico local que los alberga. Por lo mismo, se evaluaron alcances diferentes para 3 contextos geomorfológicos distintos: quebradas encajonadas y laderas suaves, laderas empinadas, y acantilados.

Para determinar los sectores susceptibles de ser alcanzados por deslizamientos generados pendiente arriba, se utilizó un modelo generado en GIS. Este modelo crea un set de puntos aleatorios distanciados cada 1 metro mínimo en las zonas de susceptibilidad de generación “Alta” y “Muy Alta” (ver Sección ANEXO O). Para cada contexto geomorfológico se crearon sets de puntos distintos. Con estos sets de puntos, y con la estadística de los alcances de los deslizamientos inventariados, se asignaron diferentes valores de alcance, con los que se llevó a cabo el modelo en GIS (CUADRO N° 2-18).

CUADRO N° 2-18 Valores de alcance utilizados para el modelo en GIS, y número de puntos de cada set de puntos.

Contexto geomorfológico	N° de puntos creados	Valores de alcance [m]
Quebradas encajonadas y laderas suaves	244.545	150 - 100 - 50 - 20
Laderas empinadas	134.655	250 - 150 - 100 - 50
Acantilados	530.572	500 - 350 - 200 - 100

Fuente: Elaboración propia. Estos valores fueron obtenidos de acuerdo a la estadística de alcances de los deslizamientos inventariados. Cada set de puntos fue desplazado 4 distancias distintas (valores de alcance)

El modelo utilizado considera la dirección y sentido del alcance, desplazando los puntos las distancias definidas en el CUADRO N° 2-18, desde las zonas de generación en la dirección de drenaje de la ladera (obtenida de la carta de exposición). A partir de lo anterior, se creó un set de puntos desplazados para cada contexto geomorfológico, y luego se unieron. El total de puntos resultantes fue utilizado para generar un mapa de densidad de puntos. La densidad de puntos se calculó con una celda de 5 metros de lado.

Estos mapas resultantes muestran el número de puntos (alcances) por metro cuadrado para cada celda de 5 x 5 m. Esto fue normalizado, obteniendo como máximo de densidad un valor de 1 y mínimo 0. Finalmente, estos datos fueron agrupados según rangos de valores, de tal manera que la distribución espacial de tales rangos tuviera consistencia con las observaciones del equipo consultor.

Los rangos de densidad normalizada, con sus respectivos grados de susceptibilidad, se presentan en el CUADRO N° 2-19.

CUADRO N° 2-19 Susceptibilidad de alcance de deslizamientos según la densidad de puntos

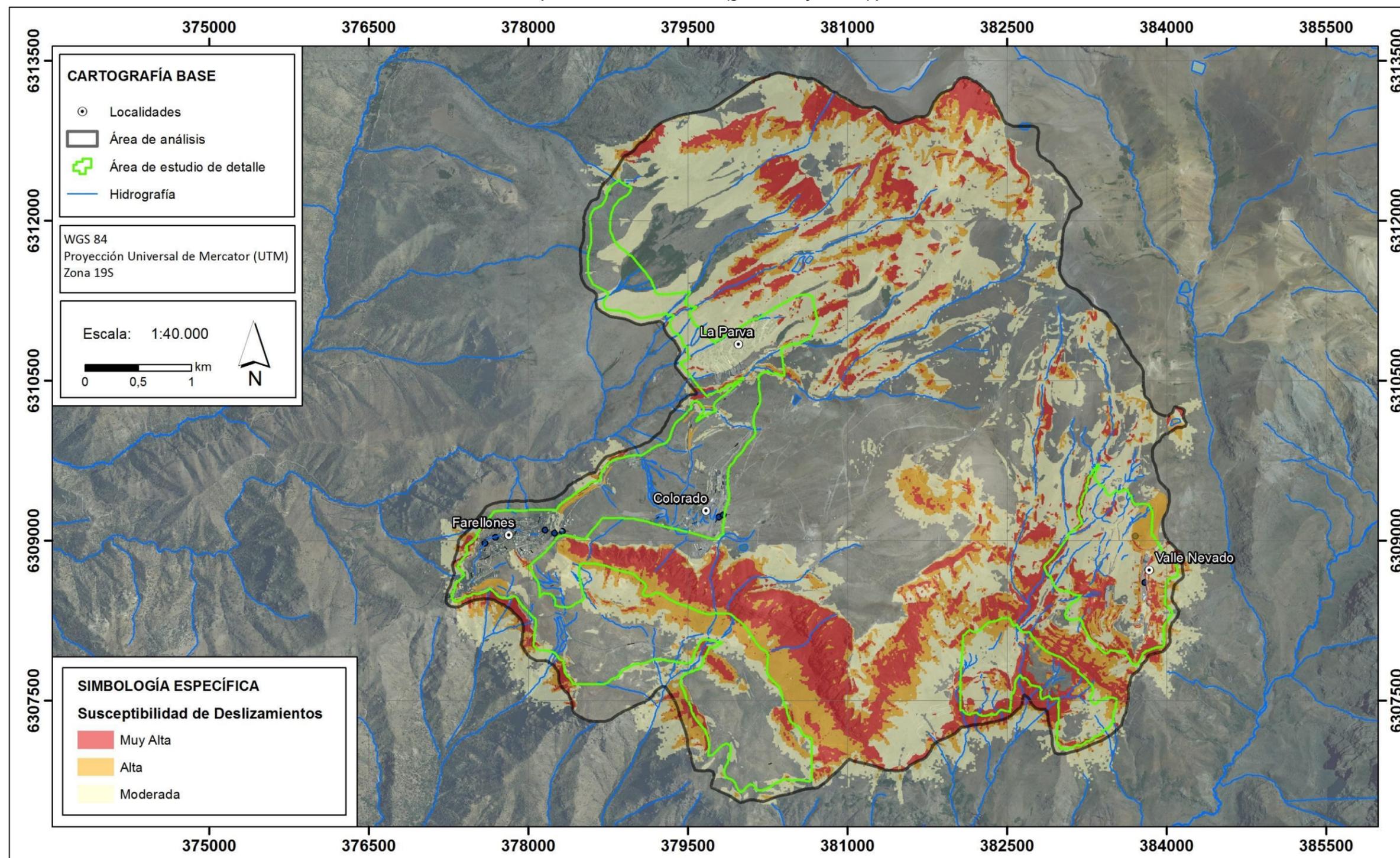
Cantidad de alcances por m ² , normalizados	Susceptibilidad
0 - 0,02	-
0,02 - 0,07	Moderada
0,07 - 0,15	Alta
0,15 - 1	Muy Alta

Fuente: Elaboración propia. La densidad de puntos fue normalizada, para presentar valores entre 0 y 1.

ANEXO Q Susceptibilidad de deslizamientos (total)

De modo referencial, la susceptibilidad (total) de deslizamientos, es decir, generación más alcance, se presenta dentro del informe en la FIGURA N° 2-87, y fuera de texto en los PLANOS 3A hasta 3G. Al realizar la unión, en caso de existir algún traslape, se le dio prioridad a los grados de susceptibilidad mayores.

FIGURA N° 2-87 Susceptibilidad de deslizamientos (generación y alcance) para el área de análisis.



Fuente: Elaboración propia

2.6.2.1.2 Caída de bloques y/o detritos

Tal como se indica en el catastro de peligro geológicos (ver sección 2.5.2.1), las caídas de bloques se entienden como el desprendimiento y movilización ladera abajo de clastos individualizados, que al descender pueden desintegrarse en clastos menores, acumulándose sobre la superficie como una serie de bloques dispersos. Por su parte, la caída de detritos consiste en el movimiento ladera abajo de una mezcla de fragmentos de roca y sedimentos de diversos tamaños, los que se acumulan en las laderas o al pie de éstas, formando morfologías cónicas (conos de detritos). En ambos casos, lo que condiciona la ocurrencia de este fenómeno es la disponibilidad de material para desprenderse (unidad geológica) y la presencia de altas pendientes para que el material pueda caer ladera abajo.

Debido a que la caída de bloques alcanza mayores distancias que la caída de detritos, se analizó únicamente el primer caso, ya que con esto queda contenido el segundo. El modelamiento de las caídas de bloque y/o detritos, al igual que en el caso de los deslizamientos, requiere de la delimitación de zonas de generación y zonas de alcance, por separado.

ANEXO R Susceptibilidad de generación de caída de bloques

Para la identificación de las zonas de generación de caída de bloques, se consideraron 2 factores condicionantes: la litología (unidad geológica) y la morfología del terreno (basado en las pendientes)

En el caso de las unidades geológicas, y tomando en consideración el catastro de peligros geológicos (ver sección 2.5.2.1), se observa que la unidad “Afloramientos de roca” es un potencial semillero de caída de bloques. Sin embargo, fue necesario incluir además la unidad “Depósitos glaciares”, ya que estos depósitos presentan bloques de orden métrico inmersos en una matriz más fina, lo que les da un grado de inestabilidad importante.

Con el objetivo de determinar estas zonas de generación, los polígonos de la unidad “Afloramientos de roca” fueron corregidos en aquellos sectores donde estuvieran siendo cortados por depósitos fluvio aluviales, dándoles continuidad espacial.

En términos de las morfologías del terreno que favorecen la generación de caída de bloques, se observa que las pendientes mayores son más susceptibles frente a las pendientes menores. Por lo tanto, se definieron 4 unidades morfológicas principales a partir de la carta de pendientes (CUADRO N° 2-20). Estos rangos de pendientes fueron definidos con base en trabajos publicados anteriormente (Loye, et al., 2009), (Michoud et al., 2012), interpretación de fotografías aéreas y los antecedentes recopilados en las visitas a terreno.

CUADRO N° 2-20 Unidades Morfológicas principales en base a los ángulos de pendiente

Unidad morfológica principal	Loye, et al. (2009)	Michoud, et al. (2012)	Este Trabajo
Planicies	0 - 5°	0 - 10°	0 - 10°
Pie de talud	5 - 21°	10 - 23°	10 - 25°
Pendientes empinadas	21 - 54°	23 - 46°	25 - 35°
Acantilados	54 - 90°	46 - 90°	35 - 90°

Fuente: Elaboración Propia.

De estas unidades morfológicas principales, las consideradas como generadoras de caída de bloques corresponden a “Pie de talud”, “Pendientes empinadas” y “Acantilados”.

Finalmente, se generó una matriz para asignar el grado de susceptibilidad de generación de caída de bloques, considerando la unidad geológica y la unidad morfológica principal (CUADRO N° 2-21).

CUADRO N° 2-21 Matriz de susceptibilidad de generación de caída de bloques

Unidad morfológica principal	Afloramientos de roca	Depósitos glaciares
Planicies (0 - 10°)	-	-
Pie de talud (10 - 25°)	-	Moderada
Pendientes empinadas (25 - 35°)	Alta	Alta
Acantilados (> 35°)	Muy Alta	Muy Alta

Fuente: Elaboración Propia

ANEXO S Susceptibilidad de alcance de caída de bloques

Según se desprende del catastro de peligros geológicos (ver sección 2.5.2.1), las caídas de bloques con alcances mayores se ubican en los pies de acantilados de grandes diferencias de cotas y sin encajonamientos, y pueden alcanzar hasta los 700 m desde la fuente. Por su parte, acantilados de menores alturas generan alcances menores. Esto indica que los alcances, al igual que en el caso de los deslizamientos, muestran una dependencia del contexto geomorfológico local que los alberga.

Analizando la distribución de las caídas de bloques, se evaluaron alcances diferentes para 2 contextos geomorfológicos distintos: "Acantilados" y "Otros".

Para determinar los sectores susceptibles de ser alcanzados por deslizamientos generados pendiente arriba, se utilizó un modelo generado en GIS (ver explicación en la Sección ANEXO P). Con una estadística general de los alcances de las caídas de bloques inventariadas, se asignaron diferentes valores de alcance, con los que se llevó a cabo el modelo en GIS (CUADRO N° 2-22).

CUADRO N° 2-22 Valores de alcance utilizados para el modelo en GIS, y número de puntos de cada set de puntos.

Contexto geomorfológico	N° de puntos creados	Valores de alcance [m]
Acantilados	423.895	700 - 500 - 300 - 100
Otras	372.590	175 - 125 - 75 - 25

Fuente: Elaboración propia. Estos valores fueron obtenidos de acuerdo a la estadística de alcances de las caídas de bloques inventariadas. Cada set de puntos fue desplazado 4 distancias distintas (valores de alcance)

El modelo utilizado considera la dirección y sentido del alcance, desplazando los puntos las distancias definidas en el CUADRO N° 2-22, desde las zonas de generación en la dirección de drenaje de la ladera (obtenida de la carta de exposición). A partir de lo anterior, se creó un set de puntos desplazados para cada contexto geomorfológico, y luego se unieron. El total de puntos resultantes fue utilizado para generar un mapa de densidad de puntos. La densidad de puntos se calculó con una celda de 5 metros de lado.

Estos mapas resultantes muestran el número de puntos (alcances) por metro cuadrado para cada celda de 5 x 5 m. Esto fue normalizado, obteniendo como máximo de densidad un valor de 1 y mínimo 0. Finalmente, estos datos fueron agrupados según rangos de valores, de tal manera que la distribución espacial de tales rangos tuviera consistencia con las observaciones del equipo consultor.

Los rangos de densidad normalizada, con sus respectivos grados de susceptibilidad, se presentan en el CUADRO N° 2-24

CUADRO N° 2-23 Susceptibilidad de alcance de caída de bloques según la densidad de puntos

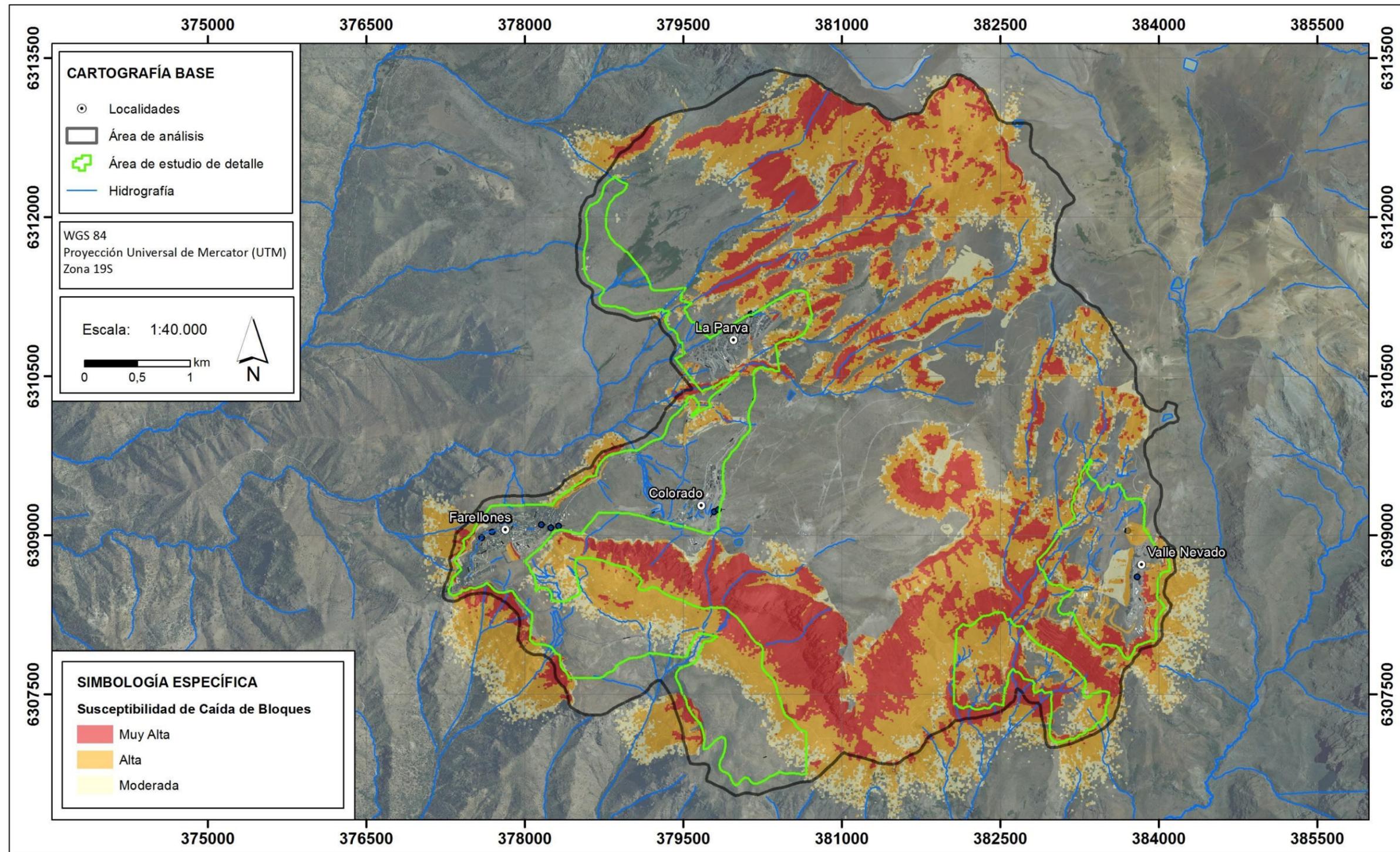
Cantidad de alcances por m ² , normalizados	Susceptibilidad
0 - 0,005	-
0,005 - 0,015	Moderada
0,015 - 0,1	Alta
0,1 - 1	Muy Alta

Fuente: Elaboración propia. La densidad de puntos fue normalizada, para presentar valores entre 0 y 1.

ANEXO T Susceptibilidad de caída de bloques (total)

De modo referencial, la susceptibilidad (total) de caída de bloques, es decir, generación más alcance, se presenta dentro del informe en la FIGURA N° 2-88, y fuera de texto en los PLANOS 2A hasta 2G. Al realizar la unión, en caso de existir algún traslape, se le dio prioridad a los grados de susceptibilidad mayores.

FIGURA N° 2-88 Susceptibilidad de caída de bloques (generación y alcance) para el área de análisis.



Fuente: Elaboración propia

2.6.2.1.3 Retroceso de laderas

Las zonas escarpadas que se ubican en depósitos no consolidados, muestran evidencias de erosión en forma de calcatas. Debido a la inestabilidad propia de los depósitos no consolidados, es necesario suponer un proceso activo de "Retroceso de ladera" en todos estos escarpes. Por lo mismo, se marcaron tales escarpes y se determinó un *buffer* de seguridad de 20 m. Dentro de este *buffer*, se consideró la siguiente zonificación:

- **Muy Alta Susceptibilidad:** *buffer* de 10 m considerados desde los escarpes de depósitos no consolidados y ladera arriba.
- **Alta Susceptibilidad:** *buffer* de 10 m considerados desde la franja de Muy Alta susceptibilidad, y ladera arriba.

De modo referencial, la susceptibilidad de retroceso de ladera se presenta dentro del informe en la FIGURA N° 2-89, y fuera de texto en los PLANOS 2A hasta 2G.

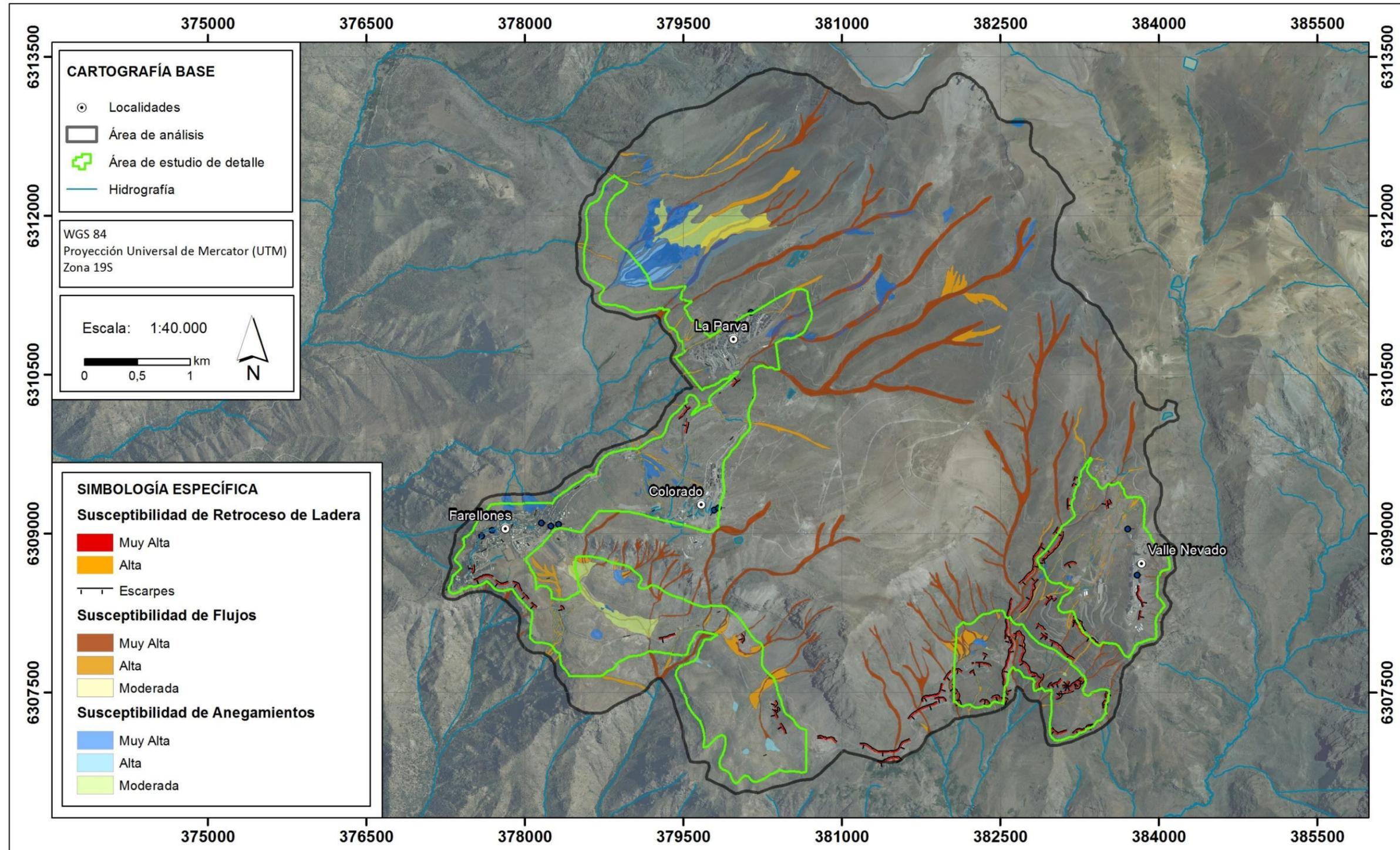
2.6.2.1.4 Flujos de detritos y/o barro

Los flujos de detritos y/o barro identificados en la zona de análisis están ubicados en la parte sur, entre Farellones y Valle Nevado. Espacialmente están restringidos a zonas de poca extensión superficial (áreas <0.05 km²), donde se desarrollan abanicos aluviales activos en las desembocaduras de quebradas en zonas llanas. Debido a la relativa escases de los mismos, no fue posible desarrollar un estudio estadístico para extraer conclusiones respecto de sus factores condicionantes. Sin embargo, debido a que los abanicos aluviales están genéticamente vinculados a la ocurrencia de flujos de detritos y/o barro (ya que los primeros son el resultado del depósito secuencial de los segundos), se utilizaron los depósitos aluviales como criterio geomorfológico para determinar las zonas con susceptibilidad de ser afectadas por flujos. Adicionalmente, los depósitos fluvio aluviales, así como determinadas zonas de depósitos lacustres, también fueron consideradas como zonas susceptibles. El detalle de los criterios de zonificación se presenta a continuación.

- **Muy Alta Susceptibilidad:** depósitos fluvio aluviales de quebradas principales, y depósitos fluvio aluviales de quebradas secundarias que presentan altas pendientes, y cuyos rasgos morfológicos evidencian actividad reciente de flujos.
- **Alta Susceptibilidad:** depósitos fluvio aluviales de quebradas secundarias que presentan pendientes suaves; depósitos aluviales; y llanuras de inundación de quebradas principales.
- **Moderada Susceptibilidad:** llanuras de inundación de quebradas secundarias de baja pendiente.

De modo referencial, la susceptibilidad de flujos se presenta dentro del informe en la FIGURA N° 2-89, y fuera de texto en los PLANOS 3A hasta 3G.

FIGURA N° 2-89 Susceptibilidad de retroceso de laderas, flujos y anegamientos, para el área de análisis.



Fuente: Elaboración propia

2.6.2.1.5 Avalanchas de nieve

Para el estudio de avalanchas de nieve, se analizaron las avalanchas que fueron reconocidas en el catastro. Dentro de los parámetros analizados se consideró lo siguiente:

- Caracterización de las zonas de generación, zonas de recorrido y zonas de alcance.
- Caracterización de las trayectorias de caída de las avalanchas en las sendas (una sola trayectoria, trayectorias múltiples, etc.).
- Caracterización y clasificación de los tipos de Avalanchas de Nieve que ocurren en el área de estudio.
- Clasificación según magnitud o masa de la avalancha de nieve que puede afectar el área de estudio.
- Clasificación según la forma de la senda de Avalancha de Nieve (cóncava, convexa o mixta).

ANEXO U Clima

El clima de la zona central de Chile se puede clasificar como Clima Templado-Cálido con lluvias invernales y estación seca prolongada (7 a 8 meses), este clima se prolonga a través de los valles hacia sectores más cordilleranos pudiendo alcanzar altitudes de 1600 a 1700 m s.n.m. (Fuenzalida, 1971), al llegar a la Cordillera de los Andes las precipitaciones se incrementan por efecto topográfico (Miller, 1976). Por sobre los 1800 m s.n.m. se presenta un tipo de clima más frío, caracterizado por una atmósfera más seca y con temperaturas variables entre un mínimo de -10 °C y un máximo de 20 °C. Se caracteriza por presentar precipitaciones que se concentran en el período invernal, pudiendo extenderse hacia el otoño y primavera (abril-septiembre), las que son fundamentalmente en forma sólida, es decir, nieve o hielo (Luca, 2001).

ANEXO V Sendas de avalanchas en el área de estudio

El área de estudio, áreas urbanas del Centro Cordillera de la comuna de Lo Barnechea, que incluye Farellones, La Parva, El Colorado y Valle Nevado, está afectado por sendas de avalanchas que se inician en las laderas y quebradas de esta zona. Se establecieron 130 sendas de avalanchas de distintos tamaños y formas. Las zonas de las sendas de avalanchas fueron identificadas en los mapas topográficos proporcionados.

Las sendas de avalanchas se dividieron en dos grupos: 1) sendas de avalanchas que afectan a las zonas de Farellones, La Parva, El Colorado y Valle Nevado que pueden ser generadas aguas arriba del área de estudio y que podrían afectar el área por alcance, con un total de 86 sendas de avalanchas identificadas, catalogadas desde 1 a 86 siguiendo un orden aproximado norte a sur y 2) sendas de avalanchas que tienen sus zonas de inicio en las zonas de Farellones, La Parva y Valle Nevado y su desarrollo es aguas abajo fuera del área de estudio (área urbana), con un total de 44 sendas de avalanchas identificadas, catalogadas desde 101 a 144 norte a sur.

En este trabajo se consideró que la nieve que se deposita en la zona de estudio en el período invernal puede ser desde la cota donde se ubica el pueblo de Farellones. Debido a diferentes antecedentes, imágenes satelitales y visitas a terreno se puede establecer que en estos sectores la ocurrencia de avalanchas de nieve es muy baja y posiblemente pudieran ocurrir en períodos de máxima precipitación anual.

Es muy probable que nunca una sola avalancha ocupara toda la amplitud y extensión de una senda, pero las diversas avalanchas que pueden iniciarse en los diversos puntos de la senda, y que transitan con ejes de caída diferentes, en conjunto si tienen la posibilidad de cubrir toda la extensión indicada.

Debido a que durante una tormenta diversas avalanchas puedan iniciarse en diferentes puntos de una misma senda, y viajar a lo largo de ejes de caídas diferentes, la suma de todos los depósitos de avalanchas en una senda pueden cubrir un área muy variable de la zona de depositación de esa senda.

Adicionalmente es posible que se produzcan varias avalanchas en una misma senda durante una sola tormenta, y que sus depósitos se superpongan, al menos en parte si las zonas de depositación no son confinadas.

De manera general y por el tipo de clima que existe en las montañas de la Cordillera del centro de Chile, las avalanchas se inician cuando la profundidad de nieve fresca apoyada directamente sobre el suelo es superior a aproximadamente 0,5 m, o superior a 0,3 m si descansa sobre una superficie de nieve de mayor antigüedad. En la medida que la acumulación de nieve se incrementa durante una tormenta, se producen en la zona, inicialmente, pequeñas avalanchas, o bien simplemente no se producen avalanchas sino hasta que se haya acumulado una cantidad apreciable de nieve en las laderas y se inician, directamente, avalanchas mayores.

Hay que destacar que existen limitaciones básicas en este estudio que se refieren principalmente a la escasa observación que existe de la ocurrencia de avalanchas de nieve en el área, y a la ausencia de observaciones de nieve y climatológicas en el área de estudio y en la zona de inicio de las avalanchas de nieve.

ANEXO W Descripción de sendas de avalanchas por sectores

- Sector La Parva

En el sector de La Parva, se identificaron 11 sendas de avalanchas, de las cuales más de un 50% tiene una zona de inicio abierta y una zona de depositación confinada o canalizada. Por lo general presentan una trayectoria principal y una zona de inicio. La mayoría de las sendas de avalanchas son convexas y convexas-rectas (ver mapa de ubicación y tabla de descripción resumida de las sendas de avalancha en el ANEXO WW).

Sector La Parva – Farellones

Entre La Parva y Farellones, se identificó una senda de avalancha (senda N° 12), la cual tienen su zona de inicio y parte de la zona de recorrido en área de estudio y su zona de depósito aguas abajo. Se caracteriza por ser convexa, la zona de inicio es abierta y la zona de depósito confinada (ver mapa de ubicación y tabla de descripción resumida de las sendas de avalancha en el ANEXO WW).

- Sector Farellones – Valle Nevado

Entre Farellones y Valle Nevado, se identificaron 55 sendas de avalanchas aguas arriba de la zona urbana, teniendo sus zonas de depósitos cerca o en la zona urbana. Se caracterizan por tener una zona de inicio y una trayectoria principal, la mayoría de las sendas de avalanchas. Además, tienden a desarrollar una zona de inicio abierta, una zona de recorrido confinada y una zona de depósito abierta, por esta razón varias sendas de avalanchas se traslapan en la zona de depósito (ver mapa de ubicación y tabla de descripción resumida de las sendas de avalancha en el ANEXO WW).

- Sector Valle Nevado

En el sector de Valle Nevado, se identificaron 20 sendas de avalanchas, estando la mayoría entre la curva 1 y la curva 8, del camino a Valle Nevado. Las sendas de avalanchas se caracterizan por ser abiertas y convexas en su mayoría. Casi un 50% de las sendas de avalanchas definidas en este sector se descargan hacia una senda de avalancha mayor, cauce y/o quebrada. Estas sendas de avalanchas pueden contener más de una zona de inicio y más de un eje por donde se encausarían dichas avalanchas (ver mapa de ubicación y tabla de descripción resumida de las sendas de avalancha en el ANEXO WW).

En general en la zona de estudio las sendas de avalanchas son de tamaño pequeño a intermedio, sendas de avalancha grandes se asocian a quebradas mayores con sendas de avalanchas tributarias.

ANEXO X Susceptibilidad de avalanchas de nieve

La zonificación de avalanchas requiere determinar las condiciones que dan origen a las avalanchas en el área que se estudia y las sendas de avalanchas propiamente tales. Las sendas de avalanchas están determinadas, principalmente, por las condiciones geomorfológicas del área que se estudia. Entre estas destaca la pendiente, que es el factor condicionante de primer orden respecto a la acumulación y estabilidad de la nieve.

Utilizando la topografía disponible e imágenes satelitales de la zona de estudio, se determinaron las sendas de avalanchas y sus cotas de inicio, considerando los rangos de pendientes definidos anteriormente para los distintos segmentos de una senda de avalancha (generación, recorrido y depósito). Las sendas de avalanchas definidas son confinadas a quebradas con una o más zonas de inicio o abiertas asociadas a las laderas principalmente. También se observa la forma de la ladera, las que se diferencia entre laderas rectas, cóncavas, convexas o la combinación de las anteriores. Cada una de ellas tiene implicaciones para la capacidad que tiene la ladera para acumular nieve y a consecuencia de ello la generación de avalanchas de nieve.

Para la estimación de la zona de depósito se consideró que las avalanchas normalmente se detienen cuando la pendiente disminuye a menor de 15° y con certeza bajo los 11° . Para estimar la distancia recorrida de las avalanchas en las sendas, en todas las sendas mayores se observaron los posibles ejes de caída de las avalanchas de nieve.

Se debe mencionar que existen limitaciones básicas en este estudio que se refieren principalmente a la escasa y/o nula observación que existe de la ocurrencia de avalanchas de nieve en el área, y a la poca información de observaciones de nieve y climatológicas en el área de estudio y en la zona de inicio de las avalanchas de nieve.

Debido a esto y en consecuencia, que las avalanchas son resultado de una combinación de factores climáticos y de la masa de nieve, que no siempre se repite, y en ocasiones es única, llevar una estadística de los desencadenantes y condicionantes es una tarea compleja y pocas veces posible con los datos disponibles. Mears (1979) señala que para conocer la relación entre el comportamiento de las avalanchas y las variaciones climáticas de una zona, con un 90% de confianza, es requerido un período de 200 a 300 años de observaciones que incluyan registros climáticos y de ocurrencia de avalanchas. Condición que se cumple en muy pocos lugares en el mundo. El mismo autor (1992) señala que para poder asegurar la no ocurrencia de avalanchas en cierta zona, asociado a un período de diseño de alguna obra con una certeza de 90%, es necesario contar con observaciones de al menos el doble de tiempo del período de diseño. Estas observaciones deben ser sistemáticas y continuas para el área de estudio. De la misma manera, raramente estas observaciones existen para algún área del mundo.

A partir de lo anterior, respecto a las condiciones desencadenantes de avalanchas, que son los fenómenos climatológicos, se requiere tener una cobertura estadística significativa para el área de estudio. Esto significa una recolección sistemática y ordenada de datos como espesor de nieve, temperaturas, precipitaciones y vientos, que permitan conocer el comportamiento del manto nival para un período representativo de las variaciones climáticas interanuales. Lo anterior debe hacerse a una escala adecuada a la frecuencia y escala de las sendas de avalanchas reconocidas para la zona de estudio.

Junto a lo anterior se requiere un monitoreo y registro estadístico sistemático a lo largo de varios años para identificar cuáles de las sendas de avalanchas reconocidas son las que presentan ocurrencia más frecuente, y cuáles son las condiciones que las generan en cada una de ellas.

ANEXO Y Resultados

El área de estudio, áreas urbanas del Centro Cordillera de la comuna de Lo Barnechea, que incluye Farellones, La Parva, El Colorado y Valle Nevado, está afectado por sendas de avalanchas que se inician en las laderas y quebradas de esta zona. Se establecieron 130 sendas de avalanchas de distintos tamaños y formas. Las zonas de las sendas de avalanchas fueron identificadas en los mapas topográficos proporcionados.

Las sendas de avalanchas se dividieron en dos grupos: 1) sendas de avalanchas que afectan a las zonas de Farellones, La Parva, El Colorado y Valle Nevado que pueden ser generadas aguas arriba del área de estudio y que podrían afectar el área por alcance, con un total de 86 sendas de avalanchas identificadas, catalogadas desde 1 a 86 siguiendo un orden aproximado norte a sur y 2) sendas de avalanchas que tienen sus zonas de inicio en las zonas de Farellones, La Parva y Valle Nevado y su desarrollo es aguas abajo fuera del área de estudio (área urbana), con un total de 44 sendas de avalanchas identificadas, catalogadas desde 101 a 144 norte a sur.

Actualmente, no existe un registro sistemático que permita definir las zonas en el área de estudio donde han ocurrido avalanchas ni qué sectores son los que con mayor frecuencia son afectados por avalanchas.

Para estimar la susceptibilidad asociada a cada una de las sendas (catalogadas desde 1 a 86), se contrastó la información del catastro con varias propiedades de las sendas relacionadas con su morfología. Como resultado de esta comparación se concluyó que la ocurrencia de avalanchas aumenta con la superficie del área de generación y disminuye con la proporción de las sendas cubiertas con acantilados, que se ha denominado rugosidad. Uno de los parámetros que en ocasiones se utiliza es el índice de vegetación o cantidad de vegetación que existe en una senda de avalancha, en este caso no fue posible utilizar, ya que la vegetación en la zona de estudio es muy baja o nula (CUADRO WW-1).

Como consecuencia de lo indicado anteriormente, se creó un ponderador para estimar la susceptibilidad de cada senda de avalancha. Este ponderador queda representado por la siguiente expresión:

$$\text{Susceptibilidad Avalanchas} = \frac{\text{Área de Generación}}{\text{Rugosidad}} = \frac{A_{Gen}}{\left(\frac{1}{1 - P_{Acant}}\right)}$$

Donde:

A_{Gen} : Área de generación de avalanchas dentro de la senda.

P_{Acant} : Proporción del área de la senda cubierta por acantilados.

Finalmente, los criterios que establecen los rangos usados definir la susceptibilidad de cada senda se presentan en el CUADRO N° 2-24:

CUADRO N° 2-24 Rangos de Ponderador y Susceptibilidad de Sendas de Avalanchas

Susceptibilidad	Ponderador	N° Sendas
Muy alta	> 100.000	9
Alta	50.000 - 100.000	9

Moderada	10.000 - 50.000	37
Baja	< 10.000	41

Del análisis de zonación de sendas de avalanchas y su susceptibilidad se determinan 4 zonas en las cuales la susceptibilidad es moderada a muy alta. De norte a sur las cuatro zonas en el área de estudio son las siguientes:

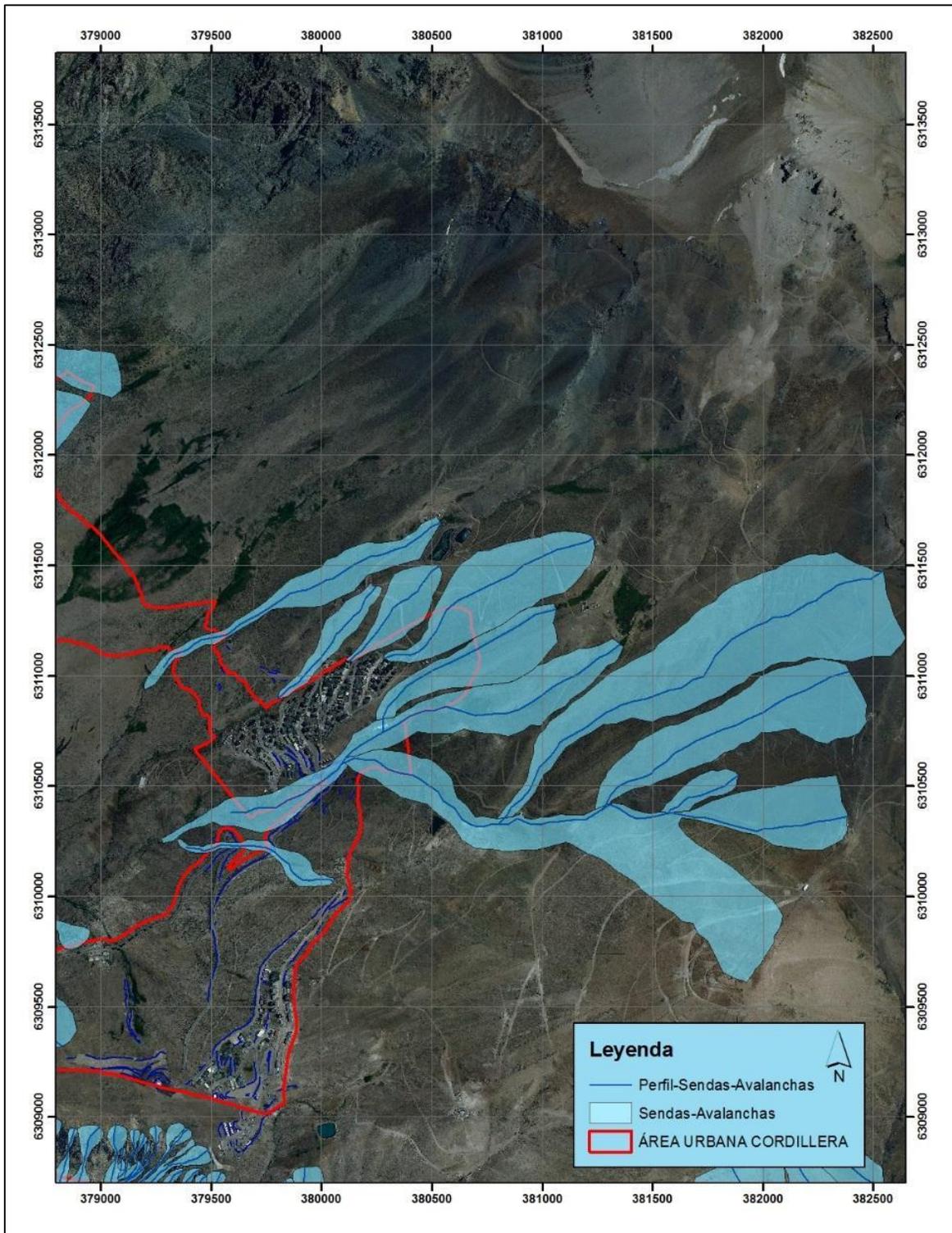
Zona 1: Sector La Parva

En esta zona, las sendas de avalancha 6, 7 y 10 han sido caracterizadas con susceptibilidad muy alta, además las sendas de avalanchas 7 y 10 son tributarias de la senda 6, lo que genera que esta última tenga más de una zona de inicio. La senda de avalancha N° 6 se identificó en la quebrada que corresponde al Estero Manzanito o Barros Negros y que se ubica en el acceso del Centro Invernal La Parva. En el sector del Centro Invernal La Parva se identifican dos sendas de avalanchas (N° 3 y 4), con un valor de susceptibilidad moderado (CUADRO WW-1 y FIGURA N° 2-90).

Zona 2: Sector entre Farellones y Valle Nevado

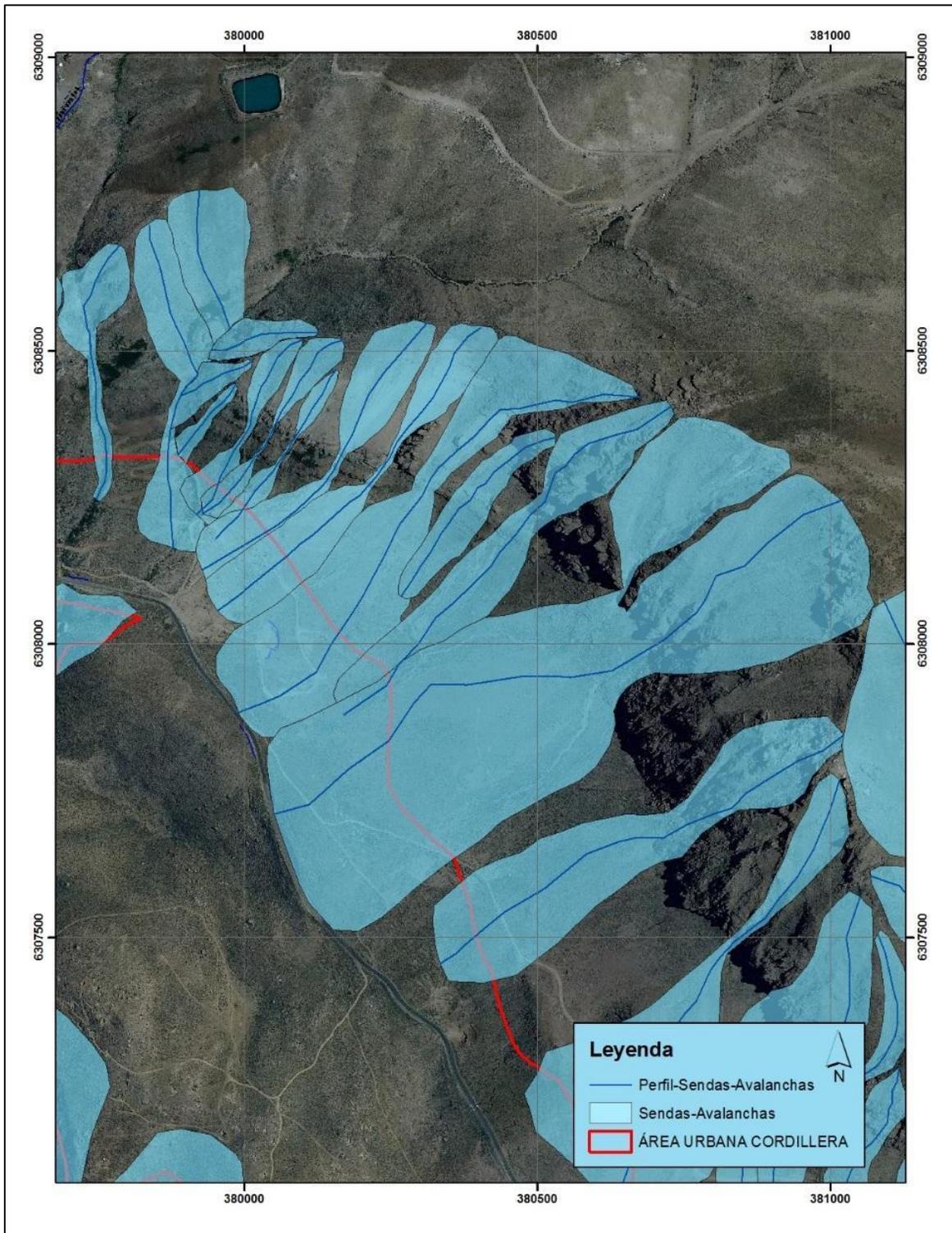
En esta zona, las sendas de avalanchas 47 y 50 han sido caracterizadas con susceptibilidad alta a muy alta. Estas sendas en casos extremos climatológicos pueden afectar el camino que une Farellones con Valle Nevado. Se debe mencionar que no ha habido registro de la ocurrencia de avalanchas de nieve en esta zona que hayan llegado al camino (CUADRO WW-1 y FIGURA N° 2-91).

FIGURA N° 2-90 Zona La Parva, donde se indica las avalanchas de nieve 3 a 11.



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA N° 2-91 Zona entre Farellones y Valle Nevado



Fuente: Elaboración propia.

Zona 3: Valle Nevado sector entre curva 1 y curva 6

En este sector se identificaron 8 sendas de avalanchas, las cuales han sido clasificadas con una susceptibilidad alta a muy alta. La ubicación de estas sendas de avalanchas y el tamaño de estas genera una potencialidad de afectar el camino hacia Valle Nevado entre las curva 1 y curva 6. Se debe mencionar como en el caso anterior que no se tiene registro de la ocurrencia de avalanchas en este sector (CUADRO WW-1 y FIGURA N° 2-92).

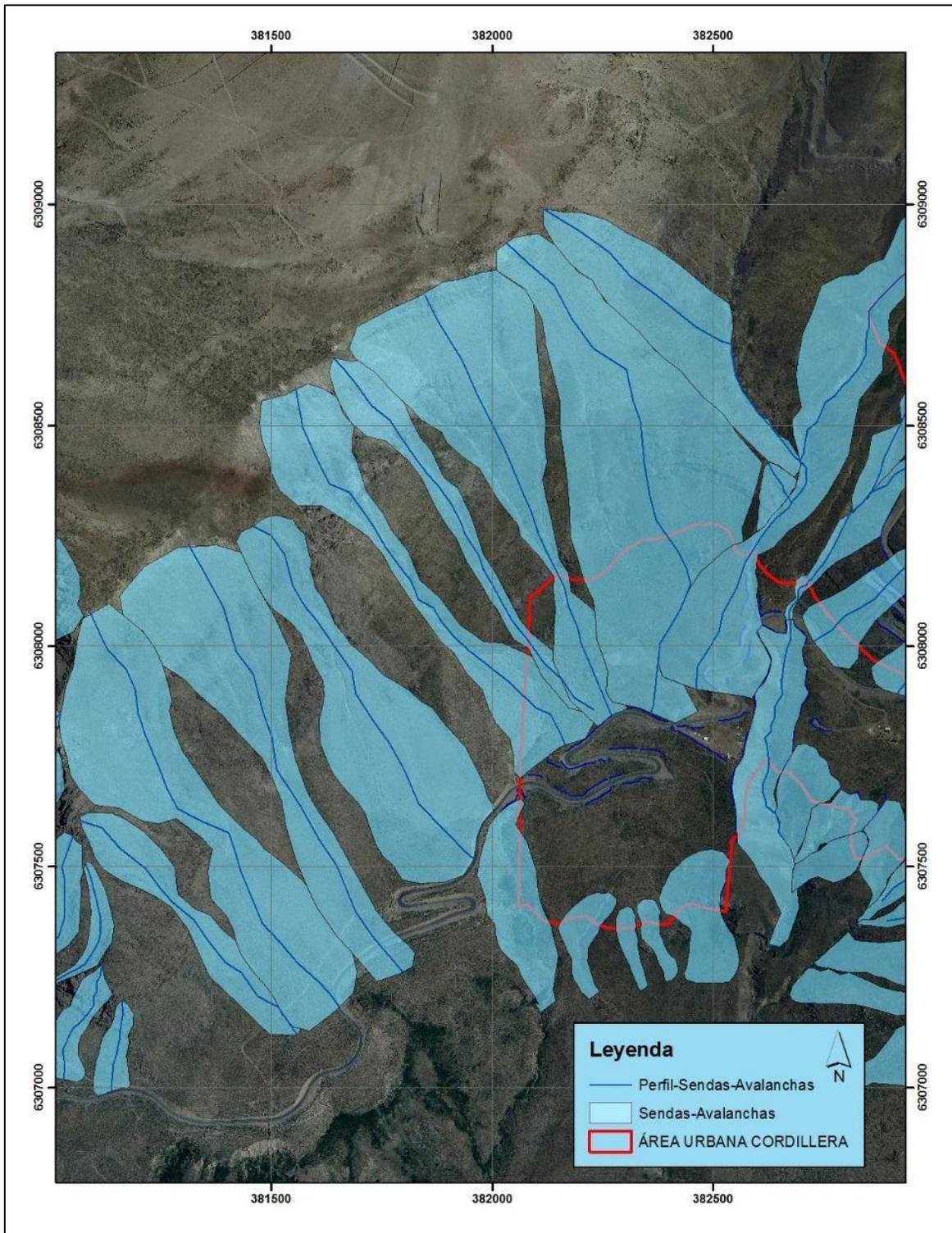
Zona 4: Valle Nevado sector de Quebrada Honda

En este sector se han identificado 4 sendas de avalanchas (N° 67, 68, 69 y 70), con índices de susceptibilidad moderado a muy alto. Las sendas de avalanchas 68, 69 y 70 son tributarias de la senda N° 67, por lo que esta última pudiera tener varias zonas de inicio. La senda de avalancha 67 cruza el camino hacia Valle Nevado entre las curvas 6 y 7. Al igual que en los casos anteriores se debe mencionar que no se tiene registro de la ocurrencia de avalanchas de nieve en este sector (CUADRO WW-1 y FIGURA N° 2-93).

Es importante recordar que para esta zonificación se asumió que la precipitación de nieve cae de manera uniforme en todas las sendas, no se consideró de forma particular porque no existe información suficiente para determinarlo. Por otra parte, en cuanto a la amenaza, no existe información para indicar la probabilidad de ocurrencia de éstas en un período determinado o asignarles un período de retorno. Lo mencionado anteriormente reafirma la importancia de tener un buen registro estadístico.

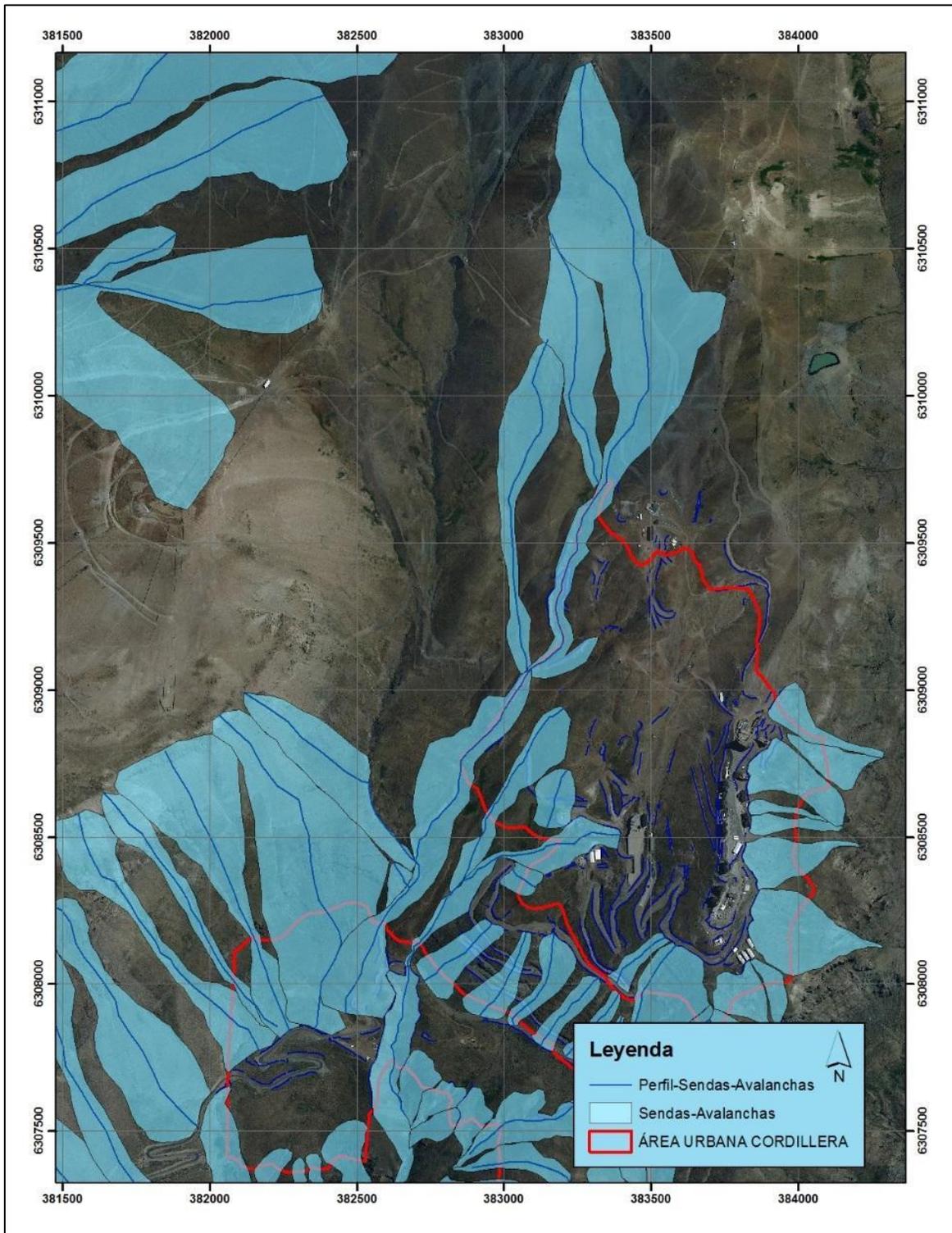
Los resultados de la zonificación de sendas de avalancha y su susceptibilidad para todo el registro se presenta en la FIGURA N° 2-94 y, fuera de texto, en los PLANOS 1A hasta 1G.

FIGURA N° 2-92 Valle Nevado sector entre curva 1 y curva 6.



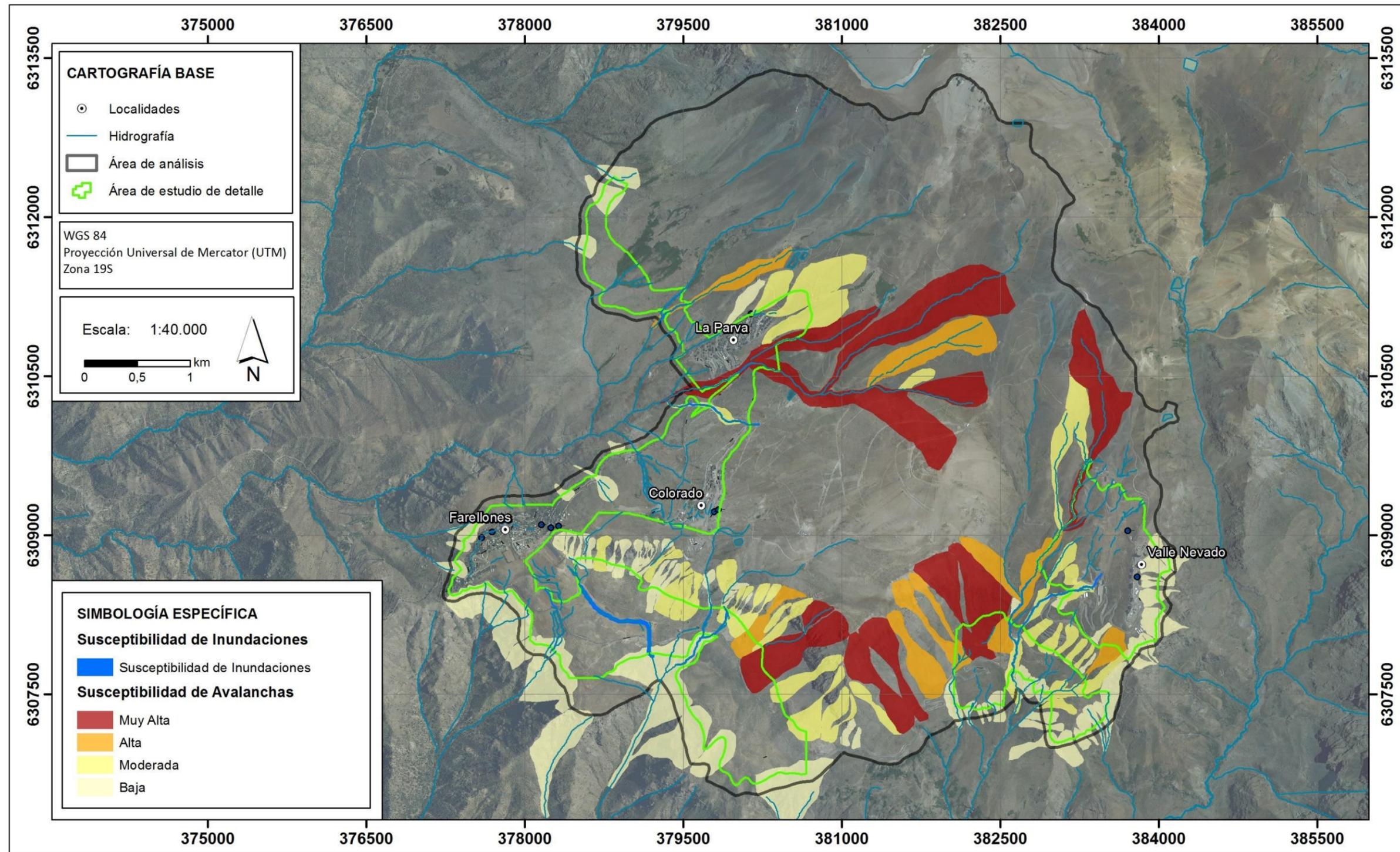
Fuente: Elaboración propia.

FIGURA N° 2-93 Valle Nevado sector de Quebrada Honda



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA N° 2-94 Susceptibilidad de inundaciones y avalanchas de nieve, para el área de análisis.



Fuente: Elaboración propia

2.6.2.2 Peligro de Anegamientos

Los anegamientos ocurren en sectores donde afloran aguas subterráneas, o donde se produce un bloqueo en la red de drenaje, lo que implica una acumulación del agua que escurre superficialmente. En el área de análisis, las evidencias de anegamientos son de 3 tipos: cuerpos de agua, presencia de vegas y depósitos lacustres. Los cuerpos de agua y las vegas se consideran como evidencias directas de anegamientos activos, por lo que se asocian con los mayores grados de susceptibilidad. Mientras que los depósitos lacustres, por su parte, son solo evidencias indirectas de anegamientos, por lo que se vinculan a un menor grado de actividad. Sin embargo, si estos depósitos lacustres se ubican en bajos topográficos, donde la red de drenaje se presenta bloqueada, aumenta su grado de susceptibilidad. El detalle de estos criterios se presenta a continuación.

- **Muy Alta Susceptibilidad:** cuerpos de agua y sectores de vegas activas.
- **Alta Susceptibilidad:** depósitos lacustres ubicados en bajos topográficos, donde la red de drenaje superficial se encuentra total o parcialmente bloqueada.
- **Moderada Susceptibilidad:** depósitos lacustres que no se incluyen en la categoría de Alta susceptibilidad.

Los resultados de la zonificación de susceptibilidad de anegamientos se presenta en la FIGURA N° 2-89 y, fuera de texto, en los PLANOS 2A hasta 2G.

2.6.2.3 Peligro de Licuefacción

Además de los efectos directos relacionados con sismos, es sabido que estos pueden inducir la ocurrencia de otros fenómenos, como es el caso de procesos de licuefacción (ver Anexo TT.1.1).

La licuefacción del terreno 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.

Para la ocurrencia de licuefacción se requiere de tres factores (Martin & Lew, 1999): depósitos o suelos, granulares poco consolidados (suelos y no cementados) de tamaño fino a medio (limo a arena, aunque en algunos casos se ha presentado en arcillas y en gravas); saturación de los depósitos por aguas subterráneas, es decir, puede producirse en zonas donde el nivel de agua subterránea es somero, como humedales, pantanos o vegas; fuertes movimientos sísmicos, durante los cuales las ondas sísmicas aumentan la presión del agua contenida en los depósitos.

Tomando en consideración estos antecedentes, para la zona de análisis se determinó el siguiente criterio de zonificación.

- **Muy Alta Susceptibilidad:** cuerpos de agua y sectores de vegas activas.

Los resultados de la zonificación de susceptibilidad de licuefacción se presenta en la FIGURA N° 2-85

2.6.2.4 Peligro de Inundación

2.6.2.4.1 Descripción del modelo

Se construyó un modelo 1D mediante el software HEC-RAS para representar el escurrimiento en las quebradas descritas en el acápite 3.4.6, con el objetivo de determinar las zonas de inundación para los periodos de retorno de 5, 10, 50, 100 y 200 años. Las quebradas que presentan confluencias dentro del área de estudio se modelaron conjuntamente y se nombraron bajo el título de “Sistemas”, al igual que el resto de las quebradas. De esta manera se formaron 8 sistemas agrupados como sigue,

- Sistema 1: Quebradas 1 y 2
- Sistema 2: Quebradas 3 y 4
- Sistema 3: Quebrada 5
- Sistema 4: Quebrada 6
- Sistema 5: Quebrada 7
- Sistema 6: Quebrada 8
- Sistema 7: Quebrada 9
- Sistema 8: Quebradas 10 y 11

Cada una de las quebradas se representó a través de secciones transversales al sentido de escurrimiento espaciadas cada 25 [m], las cuales se construyeron en base a curvas de nivel cada 10 [m]. Luego estos perfiles fueron interpolados para alcanzar un espaciamiento de 1 [m] con el objetivo de lograr mayor precisión en el cálculo hidráulico.

Junto con la geometría de las quebradas, es necesario definir la rugosidad de los cauces así como también las condiciones de borde del escurrimiento.

2.6.2.4.2 Cauces y Parámetros de Rugosidad

La rugosidad de las superficies se caracteriza mediante el coeficiente de manning, el cual consiste en un parámetro que representa la resistencia que ejerce la superficie al escurrimiento del agua, y que se relaciona con el caudal, la pendiente y geometría del cauce según la siguiente ecuación,

$$\frac{Q \cdot n}{\sqrt{i}} = A \cdot R_h^{\frac{2}{3}} \quad \text{Ecuación 1}$$

donde,

- Q : Caudal
- n : Coeficiente de Manning
- i : Pendiente del cauce
- A : Área de la sección transversal de escurrimiento
- R_h : Perímetro mojado

Entre los factores que afectan el coeficiente de manning se encuentran la rugosidad superficial (el tamaño y la forma de los granos), la presencia de vegetación, las irregularidades, el alineamiento, el tamaño y la forma del canal, la sedimentación y la socavación, las obstrucciones, el cambio estacional, etc.

Existen principalmente dos metodologías para determinar el valor del coeficiente de manning: mediante la aplicación de fórmulas o mediante la revisión bibliográfica de cauces donde su rugosidad ha sido estudiada y que presentan características similares a los cauces que se desean estudiar. Con motivo de este trabajo se estimaron los coeficientes de rugosidad a través del método de Cowan y mediante la revisión del documento del USGS "Roughness Characteristics of Natural Channels" (RCNC, 1967).

Cowan (1956) desarrolló un procedimiento para estimar el valor del coeficiente de manning, el cual queda definido por la siguiente ecuación,

$$n = m_5 \cdot (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \quad \text{Ecuación 2}$$

donde,

- n : Coeficiente de manning
- n_0 : Valor básico de n para un canal recto, uniforme y liso en los materiales naturales involucrados
- n_1 : Corrección por efecto de las rugosidades superficiales
- n_1 : Corrección por la variación de forma y tamaño de la sección transversal
- n_3 : Corrección debido a las obstrucciones
- n_4 : Corrección por presencia de vegetación
- m_5 : Consideración del efecto de los meandros

Cada uno de estos parámetros se determina según la comparación de las características del cauce vistas en terreno versus los valores propuestos por Cowan (CUADRO N° 2-25).

CUADRO N° 2-25 Valores para el cálculo del coeficiente de manning mediante la Ecuación 2.

Condiciones del canal		Valores	
Material involucrado	Tierra	n_0	0,020
	Corte en roca		0,025
	Grava fina		0,024
	Grava gruesa		0,028
Grado de irregularidad	Suave	n_1	0,000
	Menor		0,005
	Moderado		0,010
	Severo		0,020
Variaciones de la sección transversal	Gradual	n_2	0,000
	Ocasionalmente alternante		0,005
	Frecuentemente alternante		0,010-0,015
Efecto relativo de las obstrucciones	Insignificante	n_3	0,000
	Menor		0,010-0,015
	Apreciable		0,020-0,030
	Severo		0,040-0,060
Vegetación	Baja	n_4	0,005-0,010
	Media		0,010-0,025
	Alta		0,025-0,050
	Muy alta		0,050-0,100
Grado de los efectos por meandros	Menor	m_5	1,000
	Apreciable		1,150
	Severo		1,300

El principal criterio utilizado para la determinación del coeficiente de manning fue la comparación con los cauces estudiados en el RCNC, puesto que se considera al USGS una fuente válida de información y en particular aquel trabajo. A las quebradas que no se asemejaron a alguno de los cauces del RCNC se les aplicó el método de Cowan para determinar su manning. Finalmente algunas quebradas se validaron con los valores propuestos por el Manual de Carreteras (CUADRO N° 2-26).

CUADRO N° 2-26 Valores del coeficiente n de manning en cauces naturales. Manual de carreteras, Volumen 3, Tabla 3.707.104.A

Descripción	Mínimo	Medio	Máximo
Cursos Menores. De montaña (alta pendiente), sin vegetación en el canal, riberas usualmente empinadas, árboles y arbustos sumergidos a lo largo de las riberas.			
Fondo: grava, ripio y pocos bolones	0,030	0,040	0,050
Fondo: ripio y grande bolones	0,040	0,050	0,070
Planicies de inundación. Pastizales, sin matorrales			
Pasto pequeño	0,025	0,030	0,035
Pasto alto	0,030	0,035	0,040

A continuación se presenta una descripción de las quebradas y el manning estimado para cada una. Se adjuntaron fotografías sólo para las quebradas que se compararon con los cauces del RCNC. Para el resto de las quebradas referirse a las imágenes presentadas en la Sección 2.3.4.4.

ANEXO Z Quebrada 1

Durante la visita a terreno este cauce se encontraba mayormente cubierto de nieve, por lo que se requirió a imágenes de Google Street View para obtener mayor información sobre el lecho. Según las imágenes este río presenta un lecho pedregoso, poco sinuoso y con sedimentos mal seleccionados con gran variedad de tamaños y bordes afilados. La presencia de vegetación es escasa, las secciones transversales en general son bien definidas y sin grandes variaciones entre un tramo y otro. En las planicies de inundación existe mayor presencia de vegetación y también obstrucciones de mayor tamaño. Se definió un coeficiente de manning de 0,0465 para el cauce principal y 0,0515 para las planicies de inundación.

FIGURA N° 2-95 Quebrada 1

Vista desde el camino hacia aguas arriba
(Google Street View)

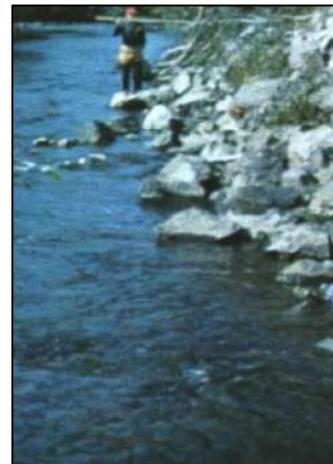
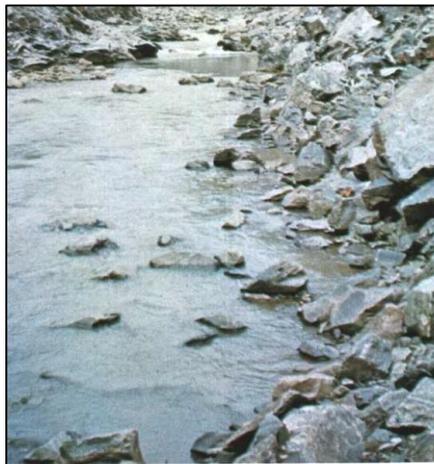


Clear Creek, $n = 0,05$

Vista desde el camino hacia aguas abajo
(Google Street View)



Catherine Creek, $n = 0,043$

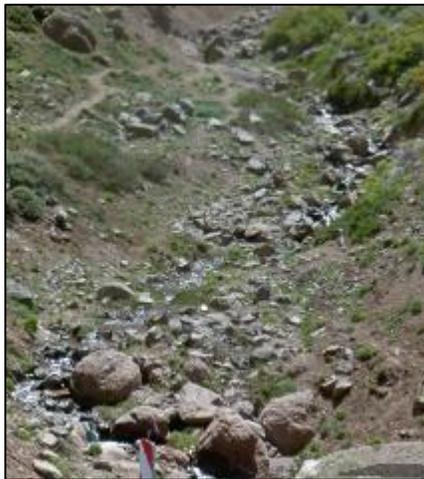


ANEXO AA Quebrada 2

Durante la visita a terreno este cauce se encontraba mayormente cubierto de nieve, por lo que se requirió a imágenes de Google Street View para observar mejor el lecho. Se observa que aguas arriba del camino la quebrada es de similares características que la Quebrada 1, pero con sedimentos de menor tamaño. Aguas abajo el lecho está conformado de grava fina bien seleccionada con presencia de algunas rocas y su sección es bastante regular. Se escogió un manning de 0,043 y 0,034 para los tramos aguas arriba y aguas abajo del camino a Valle Nevado respectivamente. En las planicies de inundación se sumó 0,005 en cada caso debido a la mayor presencia de vegetación.

FIGURA N° 2-96 Quebrada 2

Vista desde el camino hacia aguas arriba
(Google Street View)

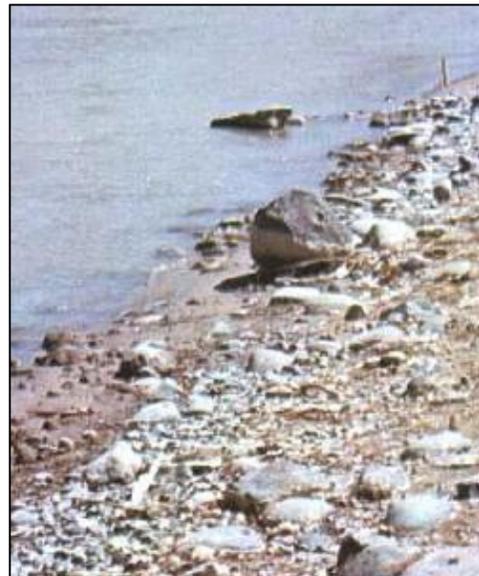
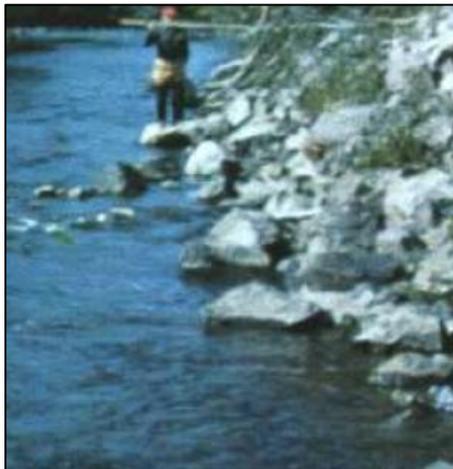


Catherine Creek, $n = 0,043$

Vista desde el camino hacia aguas abajo
(Visita a terreno)



Rio Chama, $n = 0,032 - 0,036$



ANEXO BB Quebrada 3

Esta quebrada presenta un lecho pedregoso con rocas de similar tamaño y bordes semi afilados. Aguas arriba del camino a valle nevado sigue un trazado recto, mientras que aguas abajo se observan algunos meandros. Se escogió un manning de 0,032 para el tramo aguas arriba con 0,005 adicional en la planicie de inundación, y 0,034 para el tramo aguas abajo del camino con 0,01 adicional en las planicies de inundación debido a la abundancia de vegetación.

FIGURA N° 2-97 Quebrada 3

Vista desde el camino hacia aguas arriba(Google Street View)



Vista desde el camino hacia aguas abajo(Visita a terreno)



Coeur d'Alene River, $n = 0,032$



ANEXO CC Quebrada 4

En este caso el lecho es de similares características a las de la quebrada 3, por lo que se escogió un manning de 0,032. En el caso de las planicies de inundación se adicionó 0,005.

FIGURA N° 2-98 Quebrada 4

Vista desde el camino hacia aguas arriba
(Visita a terreno)



Vista desde el camino hacia aguas abajo (Visita a terreno)



Coeur d'Alene River, $n = 0,032$



ANEXO DD Quebrada 5

Esta quebrada presenta un lecho de tierra con presencia de algunas gravas levemente redondeadas. La presencia de meandros es despreciable. Se escogió un manning de 0,031 para todo su trazado. Se consideró el mismo manning para las planicies de inundación puesto que presentan más vegetación que el canal principal pero al mismo tiempo menor presencia de gravas.

FIGURA N° 2-99 Quebrada 5

Vista desde el camino hacia aguas arriba
(Google Street View)



Vista desde el camino hacia aguas abajo
(Google Street View)



Blackfoot River, $n = 0,031$



ANEXO EE Quebrada 6

Se observa que el lecho de la quebrada está conformado por tierra y presencia de gravas con gran variedad de tamaños. El tramo aguas arriba del camino a Valle Nevado es muy irregular, a diferencia del tramo aguas abajo que presenta una forma trapezoidal más definida. La vegetación es abundante en ambos tramos. Esta quebrada no fue posible compararla con alguna del RCNC, por lo que se adoptó el método de Cowan para estimar su manning. El valor obtenido fue de 0,035. Para las planicies de inundación se consideró un valor de 0,04 debido a la mayor presencia de vegetación.

ANEXO FF Quebrada 7

Esta quebrada presenta un lecho compuesto principalmente por tierra y pastizales. No se observan mayores obstrucciones, las secciones son regulares y no varían mucho a lo largo de su trazado. A través de Cowan se estimó un manning de 0,025, el cual coincide con lo recomendado en el manual de carreteras para pastizales de pasto pequeño. Se consideró el mismo valor para las planicies de inundación ya que presentan características similares al cauce principal.

ANEXO GGQuebrada 8

Su trazado presenta diferentes características a lo largo de su trazado. Su tramo superior presenta un lecho rocoso con gravas de diverso tamaño, secciones irregulares y presencia de vegetación. Mediante Cowan se le asignó un manning de 0,034. Entre los puntos 9 y 10 de la visita a terreno (FIGURA N° 2-29), hay un sector con afloramiento de roca, al cual se le asignó un manning mayor de 0,039. En el tramo inferior las secciones son más regulares con forma trapezoidal, pero con mayor presencia de vegetación y abundante presencia de gravas en el lecho. Se le asignó una rugosidad de 0,034. Con respecto a las planicies de inundación, en la parte alta de la quebrada se adicionó 0,01 debido a que aumentan considerablemente las irregularidades del terreno, así como también la vegetación; en el tramo inferior se adicionó 0,005 por la mayor presencia de vegetación.

ANEXO HH Quebrada 9

En este caso el lecho consiste en afloramientos de roca junto con gravas de bordes afilados y diferentes tamaños. El tramo aguas arriba del camino a La Parva presenta una sección relativamente irregular y muchas obstrucciones de gravas de gran tamaño, mientras que el tramo aguas abajo presenta una sección más uniforme de forma trapezoidal y gravas de menor tamaño. La vegetación es escasa. Para el tramo aguas arriba se estimó un manning de 0,05 (Clear Creek), mientras que para el tramo aguas abajo se estimó en 0,045 (Cowan). Para las planicies de inundación se adicionó 0,05 al tramo de aguas arriba por el aumento en las obstrucciones. El tramo aguas abajo se mantuvo igual.

FIGURA N° 2-100 Quebrada 9

Vista desde el camino hacia aguas arriba
(Visita a terreno)



Vista desde el camino hacia aguas abajo (Visita a terreno)



Clear Creek, $n = 0,050$



ANEXO II Quebrada 10

En este caso la quebrada no presenta un cauce bien definido y se observan un sinnúmero de vertientes. Su lecho está compuesto de tierra y vegetación del tipo humedal. No se observan sedimentos que generen obstrucciones al flujo. Mediante Cowan se estimó un manning de 0,025 el cual se verificó con lo propuesto por el Manual de Carreteras para pastizales de pasto pequeño. A las planicies de inundación se les aplicó el mismo valor

ANEXO JJ Quebrada 11

Aguas arriba del punto de observación (punto 12, FIGURA N° 2-35) el cauce principal consiste en un lecho de gravas con presencia de algunas rocas de mayor tamaño. Su sección presenta una forma rectangular y la vegetación es escasa. Aguas abajo el lecho es de tierra con algunas gravas de menor tamaño que el tramo aguas arriba, la sección varía a trapezoidal, aumenta la presencia de vegetación y las obstrucciones de gravas son menores. Mediante Cowan se estimó un manning de 0,039 y 0,035 para aguas arriba y aguas abajo respectivamente. Para las planicies de inundación de agregó 0,005 en ambos casos.

Finalmente en el CUADRO N° 2-27 se presentan un cuadro resumen con los mannings adoptados.

CUADRO N° 2-27 Valores de coeficiente de Manning utilizados para la modelación en HEC-RAS.

Quebrada	Tramo	Coeficiente de manning	
		Cauce	Planicie de inundación
1	-	0,0465	0,0515
2	Agua arriba p/2 VT	0,043	0,048
	Aguas abajo p/2 VT	0,034	0,039
3	Agua arriba p/3 VT	0,032	0,037
	Aguas abajo p/3 VT	0,034	0,044
4	-	0,032	0,037
5	-	0,031	0,031
6	-	0,035	0,040
7	-	0,025	0,025
8	Aguas arriba sector rocoso	0,034	0,044
	Sector rocoso	0,039	0,049
	Aguas abajo sector rocoso	0,034	0,039
9	Aguas arriba p/11 VT	0,050	0,055
	Aguas abajo p/11 VT	0,045	0,045
10	-	0,025	0,025
11	Aguas arriba p/12 VT	0,039	0,044
	Aguas abajo p/12 VT	0,035	0,040

Para los p/2, p/3, p/11 y p12, referirse a las figuras del punto 2.3.4.4

2.6.2.4.3 Condiciones de Borde

Según el régimen en que se encuentre el flujo, su comportamiento estará condicionado desde aguas arriba (torrente) o aguas abajo (río). Para régimen subcrítico (río) se requieren condiciones de borde en la última sección de aguas abajo. Para régimen supercrítico (torrente) se requieren las condiciones de borde en la primera sección aguas arriba. HEC RAS realiza el cálculo para régimen mixto, en casos donde el régimen de flujo cambia de subcrítico a supercrítico, o viceversa. Para esto se requiere ingresar ambas condiciones de borde, aguas abajo y aguas arriba.

Los modelos consideran condiciones de borde aguas arriba y aguas abajo, lo cual ha permitido ejecutarlos en régimen mixto, estableciendo la condición de altura normal en base a la pendiente del terreno, tanto aguas arriba como aguas abajo a las entradas y salidas de cada sistema.

2.6.2.4.4 Resultados

Se obtuvo como resultado general que la mayoría de los escurrimientos en quebradas analizadas corresponden a régimen de torrente, es decir, queda condicionado por lo que ocurra aguas arriba del curso.

Este tipo de escurrimiento tiene como implicancia que la zona de inundación referida a períodos de retorno mayores queda acotada a poca distancia desde el cauce principal y se generan velocidades importantes. A continuación se presenta un resumen de los resultados obtenidos para cada sistema. En anexo se presentan resultados completos de las modelaciones realizadas.

ANEXO KK Sistema 1

Para este sistema se obtuvo anchos de inundación que no sobrepasan los 25 metros para T=200 años. Específicamente, en las áreas que cruzan la zona del plan regulador, se obtiene lo siguiente:

CUADRO N° 2-28 Datos Sistema 1

Quebrada	Tramo	Ancho máximo (m)	Velocidad máxima (m/s)
Q1	Aguas Arriba	20,4	5,0
Q1	Aguas Abajo	17,5	4,6
Q2	Aguas Arriba	12,1	5,3
Q2	Aguas Abajo	9,0	5,6

ANEXO LL Sistema 2

Para este sistema se obtuvo anchos de inundación que no sobrepasan los 15 metros para T=200 años. Específicamente, en las áreas que cruzan la zona del plan regulador, se obtiene lo siguiente:

CUADRO N° 2-29 Datos Sistema 2

Quebrada	Ancho máximo (m)	Velocidad máxima (m/s)
Q3	6,3	5,1
Q4	11,3	5,9

ANEXO MM Sistema 3

Para este sistema se obtuvo anchos de inundación que no sobrepasan los 30 metros para T=200 años. Específicamente, en las áreas que cruzan la zona del plan regulador, se obtiene lo siguiente:

CUADRO N° 2-30 Datos Sistema 3

Quebrada	Ancho máximo (m)	Velocidad máxima (m/s)
Q5	28,7	3,3

La quebrada 5 tiene tramos con escurrimiento mixto, en régimen de torrente y río, esto genera 2 tramos con distinto comportamiento.

ANEXO NN Sistema 4

Para este sistema se obtuvo anchos de inundación que no sobrepasan los 7 metros para T=200 años., aunque siguiendo un trazado muy irregular. Específicamente, en las áreas que cruzan la zona del plan regulador, se obtiene lo siguiente:

CUADRO N° 2-31 Datos Sistema 4

Quebrada	Ancho máximo (m)	Velocidad máxima (m/s)
Q6	6,4	2,3

ANEXO 00 Sistema 5

Para este sistema se obtuvo anchos de inundación que no sobrepasan los 20 metros para T=200 años. Específicamente, en las áreas que cruzan la zona del plan regulador, se obtiene lo siguiente:

CUADRO N° 2-32 Datos Sistema 5

Quebrada	Ancho máximo (m)	Velocidad máxima (m/s)
Q7	19,2	4,4

ANEXO PP Sistema 6

Para este sistema se obtuvo anchos de inundación que no sobrepasan los 15 metros para T=200 años. Específicamente, en las áreas que cruzan la zona del plan regulador, se obtiene lo siguiente:

CUADRO N° 2-33 Datos Sistema 6

Quebrada	Ancho máximo (m)	Velocidad máxima (m/s)
Q8	12,7	5,7

ANEXO QQ Sistema 7

Para este sistema se obtuvo anchos de inundación que no sobrepasan los 15 metros para T=200 años. Específicamente, en las áreas que cruzan la zona del plan regulador, se obtiene lo siguiente:

CUADRO N° 2-34 Datos Sistema 7

Quebrada	Ancho máximo (m)	Velocidad máxima (m/s)
Q9	12,2	4,0

ANEXO RR Sistema 8

Para este sistema se obtuvo anchos de inundación que no sobrepasan los 7 metros para T=200 años. Específicamente, en las áreas que cruzan la zona del plan regulador, se obtiene lo siguiente:

CUADRO N° 2-35 Datos Sistema 8

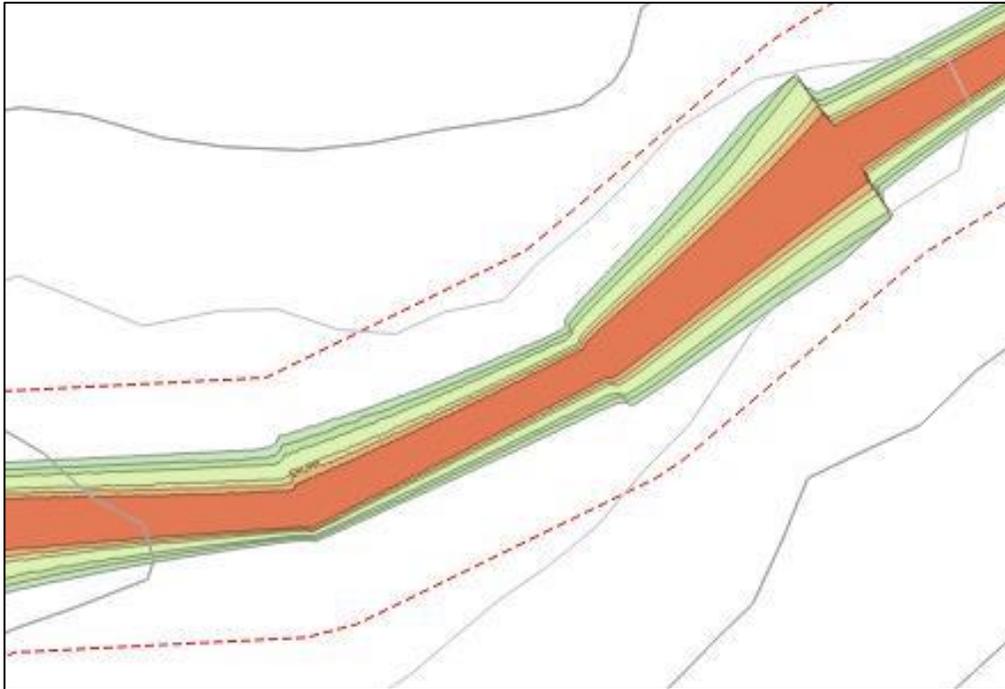
Quebrada	Ancho máximo (m)	Velocidad máxima (m/s)
Q10	6,9	1,2
Q11	5,5	4,0

2.6.2.4.5 Susceptibilidad de inundaciones (ejemplo)

En base a los resultados de los cálculos hidráulicos, se determinó para cada período de retorno los anchos de inundación y que en estos casos coincidían con velocidades máximas.

Se dibujó una envolvente a las áreas de inundación conteniendo inundaciones para períodos de retorno de hasta 200 años, otorgando un ancho fácilmente aplicable, considerando que se trata de anchos acotados. Un ejemplo del trabajo realizado se presenta en la siguiente figura, en que las zonas de colores corresponden a las simulaciones para los distintos períodos de retorno y la línea punteada representa la línea envolvente de la inundación para T=200 años.

FIGURA N° 2-101 Ejemplo de proceso de zonificación de susceptibilidad de inundación en quebradas.



Fuente: Elaboración propia

Los resultados de zonificación de susceptibilidad de inundaciones se presentan en la FIGURA N° 2-94 y, fuera de texto en los PLANOS 2A a 2G .

2.7 Áreas de riesgos considerados en el PRMS

El Capítulo 8.2 de la Ordenanza del Plan Regulador Metropolitano de Santiago determina Áreas de Alto Riesgo Para los Asentamientos Humanos, los cuales corresponden a los territorios, en los cuales el emplazamiento de asentamientos humanos se debe restringir en forma parcial o total, en consideración a las características que presentan. Esta Ordenanza trata en su artículo 8.2.1 las Áreas Riesgo de Origen Natural.

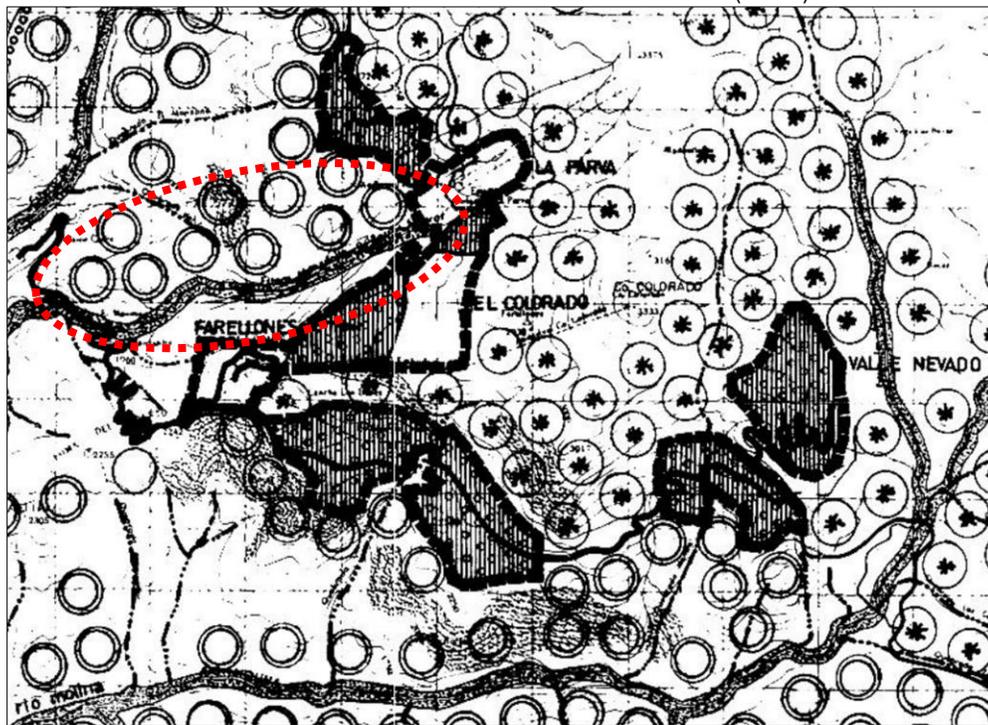
Según su propia definición “Se consideran en esta categoría las siguientes áreas: las que presentan fallas geológicas y/o inestabilidad a los sismos; las volcánicas; las de inadecuada constitución del terreno para la fundación de estructuras; las de deslizamientos de materiales o sedimentos; las de inundación por aluvión o avenidas; las de avalanchas de nieve, derrumbes y corrientes de barro, las de concentración de aguas provenientes de las precipitaciones y las áreas afectadas por otros riesgos naturales potenciales de tipo geológico, geomorfológico, hidrológico y climático”.

Esta categoría incluye los riesgos de Inundación (artículo 8.2.1.1) De Derrumbes y Asentamiento del Suelo (artículo 8.2.1.2), De Excavaciones y Laboreos Mineros (artículo 8.2.1.3) y De Riesgo Geofísico Asociado a Eventos Naturales (artículo 8.2.14).

En los listados de esta Ordenanza aparecen mencionados ríos esteros y quebradas de la comuna de Lo Barnechea pero ninguno ubicado en el área de estudio.

Solamente en el Plano PRM-02/1B del PRMS 94 se hace una mención gráfica a un curso de agua con simbología de Estero que nace en el sector La Parva y que tributa al río San Francisco, pero que no ingresa al límite urbano del área en planificación

FIGURA N° 2-1 Extracto del el Plano PRM-02/1B del PRMS 94 (oficial) en el sector.



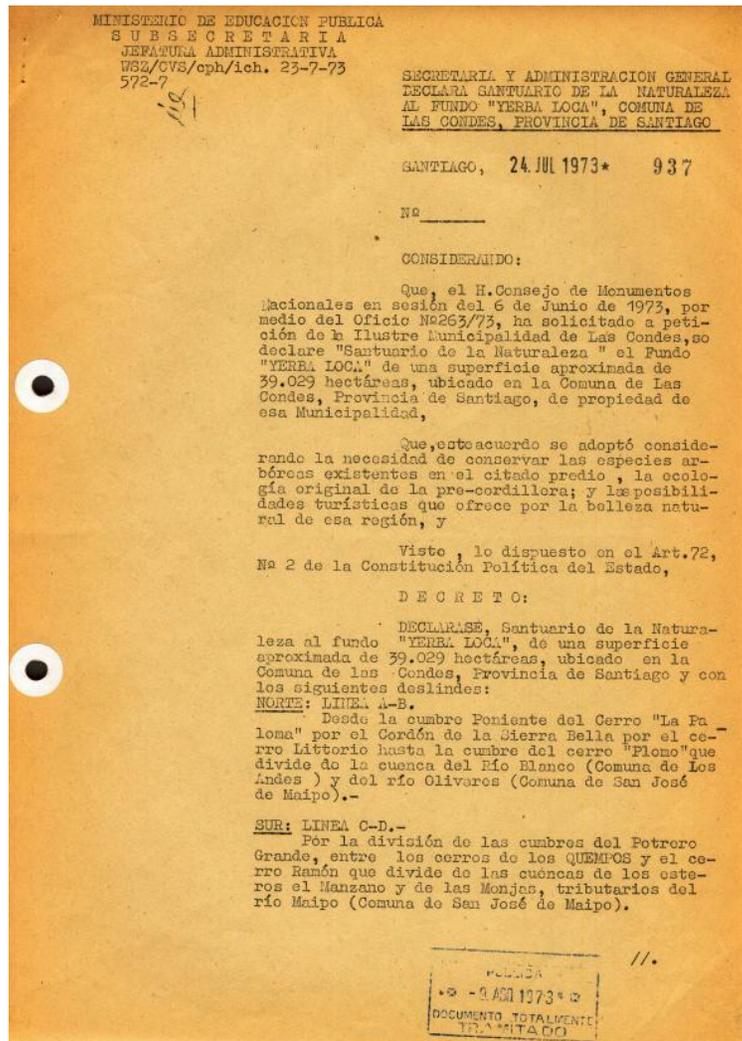
2.8 Zonas o terrenos con riesgos generados por la actividad o intervención humana.

En el área en planificación no se detectaron zonas o terrenos con riesgos generados por la actividad humana tales como piques mineros, excavaciones, relaves de minerales, depósitos de sustancias potencialmente peligrosas u otras de índole peligrosa para el ser humano.

3. ÁREAS DE PROTECCIÓN DE RECURSOS DE VALOR NATURAL

El 6 de junio de 1973, por medio del oficio N°263/73, se solicitó a petición de la Ilustre Municipalidad de Las Condes, declare "Santuario de la Naturaleza" el Fundo "Yerba Loca", de una superficie aproximada de 39.029 hectáreas, siendo declarado Santuario de la Naturaleza por medio del Decreto N°973 del 24/07/1973 del Ministerio de Educación Pública. El único documento oficial publicado al respecto se muestra en la Figura siguiente. No existe plano o cartografía oficial que muestre el área involucrada.

FIGURA N° 8-1 Decreto CMN Santuario de la naturaleza Yerba Loca



Fuente: Consejo de Monumentos Naturales

El Consejo de Monumentos Nacionales (CMN) define esta categoría de conservación como “*todos aquellos sitios terrestres o marinos que ofrezcan posibilidades especiales para estudios e investigaciones geológicas, paleontológicas, zoológicas, botánicas o de ecología, o que posean formaciones naturales, cuya conservación sea de interés para la ciencia o para el Estado*”

Debido a la carencia de cartografía oficial del área protegida, a continuación se expone la interpretación cartográfica (no oficial) del Decreto que la crea, junto con mostrar el área de análisis del presente estudio.

FIGURA N° 8-2 Interpretación cartográfica, Santuario de la naturaleza Yerba Loca



Fuente: Elaboración estudio

En consecuencia, el área a planificar está inmersa completa en este Santuario de la Naturaleza, y deben aplicarse las disposiciones del Artículo 2.1.18 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), reconociendo tal situación en forma explícita en la Ordenanza Local y en el Plano.

4. ÁEAS DE PROTECCIÓN DE RECURSOS DE VALOR PATRIMONIAL CULTURAL

En el área en planificación no se registran zonas o inmuebles de conservación histórica definidos por el plan regulador comunal ni tampoco Zona Típica o inmuebles declarados monumentos nacionales u otra figura de protección declarada por la legislación vigente.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 *Sobre zonas no edificables*

En el área en planificación solamente existen 4 helipuertos que son identificables como infraestructura peligrosa que califican para la aplicación del artículo 2.1.17 relativo a la definición de zonas no edificables. Dichas zonas no edificables se refieren a la delimitación de una zona limitadora de obstáculos para la operación de aeronaves tipo helicóptero definidas por la Dirección de Aeronáutica Civil.

5.2 *Sobre áreas de riesgo*

La legislación vigente cuenta con dos disposiciones que señalan obligaciones a los dueños de un terreno cuando este está expuesto a algún tipo de riesgo.

El primero de ellos es el artículo 134 de la Ley General de Urbanismo y Construcciones señalando que el propietario deberá ejecutar a su costa – entre otras obligaciones - “obras de defensa y de servicio del terreno” al momento de urbanizar.

El segundo cuerpo legal, la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, establece en su artículo 2.1.17, que el Plan Regulador podrá, por una parte, definir áreas restringidas al desarrollo urbano (zonas no edificables y áreas de riesgo) por constituir un peligro potencial para los asentamientos humanos y por otra, establece el procedimiento para obtener un permiso de edificación de un proyecto situado en un área de riesgo.

Bajo esa perspectiva, resulta importante definir bajo qué metodología y criterios es dable definir un área de riesgo.

5.2.1 Principios orientadores para la toma de decisiones

El principio básico a la planificación territorial debiese ser aplicar el principio precautorio frente a los riesgos. En este sentido, cualquiera sea el método que se siga, el planificador debiese tener en la mirada la necesidad de no exponer a los peligros presentes en el área en planificación ni a la población ni a la infraestructura: salvaguardar vidas es primordial en cualquier política pública, incluido un instrumento de planificación territorial.

En este sentido, es recomendable seguir los siguientes principios básicos para la ocupación de áreas expuestas a peligros naturales:

- Ocupar un área expuesta es más costoso que ocupar un área no expuesta.
- Con medidas de mitigación el peligro puede disminuir pero no desaparecer.
- En un área expuesta no se debiese localizar equipamientos esenciales (educación, salud, seguridad y gobierno) así como tampoco infraestructura pública sensible (agua potable, tratamientos de aguas servidas, energía, telecomunicaciones)
- Las normas urbanísticas en áreas expuestas debiesen estar diferenciadas y graduadas respecto a la intensidad del uso, al porcentaje de ocupación del suelo, haciendo clara diferencia en caso el área está ya consolidada o aún está sin ocupar.

- Las políticas públicas de ocupación de suelos expuestos a peligros debiesen adoptar criterios conservadores para salvaguardar la vida de las personas y también para evitar daños y pérdidas de infraestructura pública y privada.

5.2.2 Criterios para la zonificación de áreas expuestas a peligros

Para poder definir los criterios que permitan incorporar los peligros naturales dentro de la zonificación urbana, es necesario tener claros los criterios utilizados para la definición de las diferentes categorías de susceptibilidad y la zonificación resultante. Es muy relevante comprender que la categorización de susceptibilidad se relaciona con la posibilidad de ocurrencia de un fenómeno dado en un área determinada, lo que corresponde a una categorización cualitativa, de carácter relativo, y no cuantitativa. Pese a que el concepto de susceptibilidad no contempla la cuantificación de períodos de retorno ni probabilidades de ocurrencia, sí permite realizar clasificaciones según niveles que indican de manera relativa si existen mayores o menores condiciones para que ocurra un cierto fenómeno en esa área.

En otras palabras, las áreas de baja o moderada susceptibilidad se asocian a eventos excepcionales, de los que muchas veces no existen registros históricos y sólo los rasgos geológicos-geomorfológicos muestran evidencia de su ocurrencia. Las áreas de alta susceptibilidad serán aquellas que pueden ser afectadas por eventos extremos (en muchos casos, son los más grandes de los que se tiene registros históricos), en cambio las áreas de muy alta susceptibilidad son aquellas que reúnen todas las condiciones para ser afectadas por el peligro analizado en casos de eventos considerados normales.

En términos prácticos, se recomienda que mientras mayor sea el grado de susceptibilidad de un área específica a verse afectada por un evento, mayores sean las restricciones y/o condicionantes para su utilización. En este sentido, la recomendación general es que el planificador adopte en su proyecto de política pública criterios de diseño conservadores – asuma el peor escenario – para salvaguardar vidas y pérdidas materiales.

El planificador puede tomar además otras medidas de planificación relacionadas con el grado de susceptibilidad que afecta el suelo expuesto, medidas que están también dentro de las atribuciones que otorga la LGUC y la OGUC al Plan Regulador Comunal y que se relacionan con la facultad de permitir y/o prohibir usos de suelo, clases y destinos y la potestad de determinar las normas urbanísticas adecuadas a cada situación en particular.

Las recomendaciones generales son:

- Diferenciar el uso del suelo permitiendo o prohibiendo cierto tipo de uso del suelo, clase o destino
- Regular la intensidad de la ocupación del suelo, por medio de los parámetros de superficie mínima de subdivisión predial y/o el coeficiente máximo de ocupación de suelo, profundidad de antejardines, y otras similares.
- Regular con otras normas urbanísticas que incidan en la forma e intensidad de ocupación del suelo (agrupamiento, alturas, densidad, entre otras)
- Diferenciar los criterios de planificación entre los suelos ya consolidados de aquellos que no están ocupados.
- Considerar las características propias del lugar

De todas las medidas posibles, la más relevante tiene que ver con la localización de los equipamientos esenciales - también llamado equipamiento crítico - definidos como todos aquellos que deben mantener su funcionalidad aún en caso de catástrofes y por tanto no deben localizarse en áreas de riesgo. Al respecto, la recomendación es no permitir la localización en áreas de riesgo al Tipo de Uso de suelo Equipamiento de las clases Educación, Salud y Seguridad.

La regulación de la intensidad de la ocupación del suelo está relacionada, por una parte, con la idea de evitar realizar actividades que concentren personas – aunque sea en forma transitoria – ya que estas pudiesen verse afectadas por un peligro natural y por otra, poner los menores obstáculos físicos posibles al desarrollo normal de los fenómenos naturales que pueden tener lugar.

Se sugiere que la formulación de estos criterios (las reglas a seguir) se elaboren bajo la óptica del lugar, es decir tenga en cuenta las características propias de cada lugar, analizando los tipos de peligros presentes, su intensidad, si el área está ya ocupada o no lo está, y también consideraciones relacionadas con dinamismo de la actividad inmobiliaria, la cantidad de recursos que los proyectos estén dispuestos a gastar en eliminar o mitigar esos peligros, etc.

En este sentido la recomendación es diferenciar las medidas según si el área está ya ocupada o no lo está, asumiendo – bajo el principio precautorio y el sentido común – que es necesario restringir por completo el uso en aquellas áreas que no estén consolidadas y que presenten grados de Muy Alto y Alto de susceptibilidad de verse afectados por algún peligro, en cuyo caso, se recomienda – junto con la aplicación del artículo 2.1.17 - asignar solamente el Tipo de Uso Área Verde.

En el caso de las áreas ya ocupadas – áreas consolidadas – expuestas a algún tipo de peligro en grado de Muy Alto y Alto, la recomendación genérica es definir siempre Área de Riesgo sobre ese territorio y aplicar el artículo 2.1.17 para el otorgamiento de los permisos de construcción, junto con prohibir la localización de equipamiento esencial además de aplicar normas urbanísticas diferenciadas acorde con el tipo y grado de susceptibilidad del peligro que afecta el área.

En el siguiente Cuadro se entregan, en carácter de recomendación, criterios para la zonificación en áreas de riesgo para el caso del Sector Centro Cordillera de la comuna de Lo Barnechea.

CUADRO N° 5-1 Recomendación de criterios para la zonificación en áreas de riesgo

TIPO DE PELIGRO	GRADO DE SUSCEPTIBILIDAD	DESCRIPCIÓN	CRITERIO DE ZONIFICACIÓN URBANA O.G.U. y C.	
			ÁREA NO CONSOLIDADA	ÁREA CONSOLIDADA
INUNDACIÓN POR DESBORDE DE CAUCES	MUY ALTA	Quebradas principales y secundarias determinadas por el modelo hidráulico.	Riesgo (2.1.17) Uso Área Verde	Riesgo (2.1.17) Uso Área Verde
CAÍDA DE ROCAS	MUY ALTA	Sectores de afloramientos de roca o depósitos glaciares con pendientes > 35° (generación), y sectores con una densidad normalizada > 0,1 (alcance).	Riesgo (2.1.17) Uso Área Verde	Riesgo (2.1.17) Uso Área Verde
	ALTA	Sectores de afloramientos de roca o depósitos glaciares con pendientes entre 25 y 35° (generación), y sectores con una densidad normalizada entre 0,015 y 0,1 (alcance).	Riesgo (2.1.17) Uso Área Verde	Riesgo (2.1.17) Mitigación con Normas Urbanísticas Excluir equipamiento esencial
	MODERADA	Sectores de afloramientos de roca o depósitos glaciares con pendientes entre 10 y 25° (generación), y sectores con una densidad normalizada entre 0,005 y 0,015 (alcance).	Mitigación con Normas Urbanísticas Excluir equipamiento esencial	Mitigación con Normas Urbanísticas Todos los usos
DESLIZAMIENTOS	MUY ALTA	Sectores con $ISD > 1,42$ (generación), y sectores con una densidad normalizada entre 0,15 y 1 (alcance).	Riesgo (2.1.17) Uso Área Verde	Riesgo (2.1.17) Uso Área Verde
	ALTA	Sectores con ISD entre 0,34 y 1,42 (generación), y sectores con una densidad normalizada entre 0,07 y 0,15 (alcance).	Riesgo (2.1.17) Uso Área Verde	Riesgo (2.1.17) Mitigación con Normas Urbanísticas Excluir equipamiento esencial
	MODERADA	Sectores con ISD entre 0,02 y 0,07 (generación), y sectores con una densidad normalizada entre -0,93 y 0,34 (alcance).	Mitigación con Normas Urbanísticas Excluir equipamiento esencial	Mitigación con Normas Urbanísticas Todos los usos
FLUJOS DE BARRO O DETRITOS	MUY ALTA	Depósitos fluvio aluviales de quebradas principales, y depósitos fluvio aluviales de quebradas secundarias que presentan altas pendientes, y cuyos rasgos morfológicos evidencian actividad reciente de flujos.	Riesgo (2.1.17) Uso Área Verde	Riesgo (2.1.17) Mitigación con Normas Urbanísticas Excluir equipamiento esencial
	ALTA	Depósitos fluvio aluviales de quebradas secundarias que presentan pendientes suaves; depósitos aluviales; y llanuras de inundación de quebradas principales	Riesgo (2.1.17) Uso Área Verde	Riesgo (2.1.17) Mitigación con Normas Urbanísticas Excluir equipamiento esencial
	MODERADA	Llanuras de inundación de quebradas secundarias de baja pendiente.	Mitigación con Normas Urbanísticas Excluir equipamiento esencial	Mitigación con Normas Urbanísticas Todos los usos
ANEGAMIENTOS	MUY ALTA	Cuerpos de agua y sectores de vegas activas.	Riesgo (2.1.17) Uso Área Verde	Riesgo (2.1.17) Mitigación con Normas Urbanísticas Excluir equipamiento esencial
	ALTA	Depósitos lacustres ubicados en bajos topográficos, donde la red de drenaje superficial se encuentra total o parcialmente bloqueada.	Riesgo (2.1.17) Uso Área Verde	Riesgo (2.1.17) Mitigación con Normas Urbanísticas Excluir equipamiento esencial
	MODERADA	Depósitos lacustres que no se incluyen en la categoría de Alta susceptibilidad.	Mitigación con Normas Urbanísticas Excluir equipamiento esencial	Mitigación con Normas Urbanísticas Todos los usos

TIPO DE PELIGRO	GRADO DE SUSCEPTIBILIDAD	DESCRIPCIÓN	CRITERIO DE ZONIFICACIÓN URBANA O.G.U. y C.	
			ÁREA NO CONSOLIDADA	ÁREA CONSOLIDADA
RETROCESO DE LADERAS	MUY ALTA	Buffer de 10 m considerados desde los escarpes de depósitos no consolidados y ladera arriba.	Riesgo (2.1.17) Uso Área Verde	Riesgo (2.1.17) Uso Área Verde
	ALTA	Buffer de 10 m considerados desde la franja de Muy Alta susceptibilidad, y ladera arriba.	Riesgo (2.1.17) Uso Área Verde	Riesgo (2.1.17) Mitigación con Normas Urbanísticas Excluir equipamiento esencial
AVALANCHAS DE NIEVE	MUY ALTA	Ponderador de sendas de avalancha > 100.000	Riesgo (2.1.17) Uso Área Verde	Riesgo (2.1.17) Uso Área Verde
	ALTA	Ponderador de sendas de avalancha entre 50.000 y 100.000	Riesgo (2.1.17) Uso Área Verde	Riesgo (2.1.17) Mitigación con Normas Urbanísticas Excluir equipamiento esencial
	MODERADA	Ponderador de sendas de avalancha entre 10.000 y 50.000	Mitigación con Normas Urbanísticas Excluir equipamiento esencial	Mitigación con Normas Urbanísticas Todos los usos
VOLCANISMO	BAJA	-	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Basado en la experiencia, la recomendación más razonable es **aplicar esta restricción a todas aquellas áreas que tengan grado Muy Alto y Alto de susceptibilidad** de verse afectados por algún peligro y no aplicarla a las áreas con grado moderado o bajo de susceptibilidad.

De otra parte, la base conceptual de la metodología utilizada para determinar los tipos de peligros presentes y sus grados de susceptibilidad, define siete tipo de peligros zonificables, en tanto la OGUC los agrupa en 3 de origen natural y uno de origen antrópico. En este escenario, la recomendación es que las diferentes susceptibilidades identificadas se agrupen en sólo dos áreas de riesgos, como se expone en el cuadro siguiente:

CUADRO N° 5-2: Agrupamiento de susceptibilidades según OGUC

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN SEGÚN ART 2.1.17 OGUC	TIPO DE PELIGRO DE NIVEL MUY ALTO O ALTO DE SUSCEPTIBILIDAD
AR1	Zona inundable o potencialmente inundable por proximidad a ríos y quebradas	Inundación por desborde de cauces
		Anegamiento
AR2	Zona propensa a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas.	Caída de Rocas
		Deslizamientos
		Avalancha
		Retroceso de laderas
		Flujos de barro o detritos

Fuente: Elaboración del Estudio. OGUC.

En el Plano N°8 Áreas restringidas al desarrollo urbano (Láminas 8A y 8B) se muestra el resultado de la aplicación de los criterios antes explicados, graficando las áreas AR1 y AR2 con tramas separadas.

Cabe notar que en la Ordenanza Local se debe hacer mención a las normas urbanísticas aplicables para el caso que las áreas de riesgo se grafiquen como una trama que condicione la zona sobre la cual se aplica, en cuyo caso se sugiere agregar un texto del siguiente tenor:

“Las normas urbanísticas aplicables a los proyectos localizados en estas áreas que cumplan los requisitos establecidos en el inciso quinto del artículo 2.1.17 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, serán las correspondientes a la zona donde se emplaza el proyecto identificada en los planos definidos en el Artículo XX de esta Ordenanza Local y cuyas normas urbanísticas se detallan en el Artículo XX de esta Ordenanza Local”

5.3 Sobre zonas o terrenos con riesgos generados por la actividad o intervención humana.

No existe en el área en planificación zonas o terrenos con riesgos generados por la actividad o intervención humana por lo que no se entregan recomendaciones en esta materia

5.4 Sobre áreas de protección de recursos de valor natural.

El Decreto N°937 del 24 de junio de 1973 del Ministerio de Educación declaró como Monumento Nacional en la categoría de Santuario de la Naturaleza el Fundo Yerba Loca - una extensa área de la precordillera de Santiago - el cual incluye toda el área en planificación en el Centro Cordillera.

Dado que la totalidad del área normada está dentro del mencionado Santuario de la Naturaleza, corresponde reconocer tal situación en el Plano y en la Ordenanza Local, estableciendo normas urbanísticas compatibles con tal protección.

En ese sentido, y sobre la base del análisis detallado de la situación de los terrenos naturales (no intervenidos), se sugiere adoptar como criterio de planificación que todas aquellas áreas que tengan algún grado de conservación de la vegetación nativa o bien sean vegas o zonas de acumulación o de escurrimiento de aguas adopten el uso de área verde como medida de conservación, dotándola de normas urbanísticas de muy baja intensidad de uso y edificación de modo de desincentivar la modificación de su estado natural.

En resumen, se recomienda asignar uso de área verde o equipamiento deportivo con normas urbanísticas muy restrictivas a la edificación a todas aquellas áreas que se desea conservar en su estado natural (vegas y zonas con vegetación).

5.5 Sobre áreas de protección de recursos de valor patrimonial cultural

En el área en planificación no se registran zonas o inmuebles de conservación histórica definidos por el plan regulador comunal ni tampoco Zona Típica o inmuebles declarados monumentos nacionales u otra figura de protección declarada por la legislación vigente por lo tanto no se entregan recomendaciones en esta materia.

5.6 Recomendaciones fuera del ámbito de la planificación urbana

5.6.1 Recomendaciones para la protección de los glaciares de roca

Según Brenning & Azócar (2010), y las referencias citadas ahí dentro, los glaciares de roca otorgan servicios similares a los glaciares blancos. En términos de su valor de uso, se destaca el rol como fuente de agua, su contribución a la regulación del clima, su contenido de información sobre el pasado geológico y climático, y su apreciación en el turismo.

Estos autores señalan que las intervenciones sobre los glaciares de roca se pueden clasificar en 3 categorías, cada una de las cuales tiene sus propias consecuencias ambientales y económicas. Estas categorías con sus respectivas consecuencias se presentan en el CUADRO N° 5-3.

CUADRO N° 5-3 Tipos de intervenciones sobre glaciares de roca y sus posibles consecuencias.

Tipo de intervención	Posibles consecuencias ambientales	Posibles consecuencias económicas	Efectos en el tiempo
Remoción completa o parcial de glaciares de roca.	Pérdida de un reservorio de hielo subterráneo fósil, reducción de caudales de ríos.	Disponibilidad reducida de agua en la cuenca.	Cambio inmediato.
	Alteración irreversible del paisaje	Reducción del valor turístico del paisaje.	Cambio inmediato.
Creación de depósitos de lastre minero sobre glaciares de roca.	Aceleramiento, inestabilidad y posible colapso del glaciar.	Riesgo para vidas humanas e infraestructura minera y pública; necesidad de monitoreo y control.	Meses a décadas.
	Contaminación de agua almacenada en el glaciar como consecuencia del <i>Acid Rock Drainage</i> (ARD).	Necesidad de monitoreo y tratamiento del agua; mayor escases de agua.	Años a décadas.
	Degradación del permafrost y posible inestabilidad del glaciar como consecuencia de la producción de calor en reacciones exotérmicas del ARD.	Riesgo para vidas humanas e infraestructura minera y pública.	Años a décadas.
	Degradación basal del permafrost por efecto del gradiente térmico; posible inestabilidad basal.	Riesgo para vidas humanas e infraestructura minera y pública.	Décadas a siglos.
Construcción de caminos sobre glaciares de roca.	Degradación superficial del permafrost por la alteración de propiedades físicas superficiales como el albedo y la conductividad térmica.	Peligro para usuarios del camino.	Años a décadas.
	En caso de accidentes, contaminación con sustancias tóxicas transportadas (ej, combustibles).	Disponibilidad reducida de agua en la cuenca; necesidad de monitoreo.	Meses a años.

Fuente: Modificado de Brenning & Azócar (2010).

Por estas razones, se sugiere elaborar estrategias de protección de los glaciares de roca, siendo necesario realizar estudios detallados de los mismos, para determinar con mayor precisión cuáles son los glaciares de roca contenidos en el área de análisis, estudiar sus características físicas y, a partir de ello, determinar las medidas adecuadas para su protección.

5.6.2 Recomendaciones al sistema de protección civil

De manera complementaria, se recomienda que se implementen sistemas de alerta temprana y evacuación en caso de eventos meteorológicos que puedan generar deslizamientos, caídas de roca, inundaciones por desborde de cauces, flujos de barro y/o detritos, anegamientos o avalanchas de nieve. Este sistema debe contemplar un plan de emergencia que debe ser comunicado adecuada y oportunamente a la comunidad y debe ser periódicamente practicado, bajo la responsabilidad y coordinación de encargados comunales y provinciales de protección civil, con la participación de las comunidades locales.

Para mitigar los riesgos de inundaciones por desborde de cauces, flujos de detritos y/o barro y anegamientos, se recomienda construir obras destinadas a controlar el escurrimiento de aguas superficiales, su intercepción, captación, conducción y descarga controlada hacia cauces establecidos.

Para las remociones en masa del tipo deslizamiento o caída de bloques se recomienda la implementación de medidas de mitigación diseñadas mediante un estudio específico para cada sector que permita determinar las características del posible fenómeno que ocurriría en este. Es decir, definir posible tamaño de bloque y sus alcances probables para áreas con susceptibilidad de caída de bloques, y a partir de este dato diseñar y dimensionar las obras de mitigación.

Finalmente, se recomienda realizar capacitaciones a la población con respecto a los peligros geológicos, considerando sus causas y consecuencias, en las que además se informe adecuadamente acerca de las medidas a adoptar frente a situaciones de emergencia (sistemas de alerta, vías de evacuación, zonas seguras). Se recomienda diseñar y generar paneles informativos y señalética que permita a los visitantes del sector enterarse de los potenciales peligros del sector, comprender qué hacer en caso de ocurrencia de algún evento, e identificar áreas seguras dentro del territorio cubierto por el presente estudio. En caso que la autoridad no pueda dar una alerta oportuna, la educación y conocimiento acerca de los diferentes peligros y riesgos geológicos locales puede salvar vidas, ya que condiciona a la población a tener una reacción adecuada y autónoma.

6. REFERENCIAS CITADAS EN EL TEXTO

- Antinao, J., Fernández, J., Naranjo, J. & Villarroel, P., 2002. *Peligro de Remociones en Masa e Inundaciones en la Cuenca de Santiago*, Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile. Serie Geología Ambiental, No. 2, 1 mapa escala 1:100.000.
- Araneda, M., Avendaño, M. & Merlo, C., 2000. *Modelo Gravimétrico de la Cuenca de Santiago, Etapa III Final. Actas IX Congreso Geológico Chileno, Vol. 2, p. 404-408.*, s.l.: s.n.
- Armijo, R. y otros, 2010. The West Andean Thrust, the San Ramón Fault, and the seismic hazard for Santiago, Chile. *Tectonics*, 29(2), pp. 1-34.
- Azócar, G. & Brenning, A., 2009. *Hydrological and Geomorphological Significance of Rock Glaciers in the Dry Andes, Chile (27°-33°S)*. s.l.:Permafrost and periglacial processes.
- Barrientos, S., Vera, E., Alvarado, P. & Monfret, T., 2004. Crustal seismicity in central Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 16(8), pp. 759-768.
- Bonham & Carter, 1994. *Geographic information systems for geoscientists, modeling with GIS*. Pergamon, Oxford. s.l.:s.n.
- Brenning, A., 2005. *Climatic and geomorphological controls of rock glaciers in the Andes of Central Chile: combining statistical modelling and field mapping*. s.l.:s.n.
- Brenning, A. & Azócar, G., 2010. *Minería y glaciares rocosos: impactos ambientales, antecedentes políticos y legales, y perspectivas futuras.* s.l.:Revista de Geografía Norte Grande, 47: 143-158.
- Brilha, J., 2015. *Inventory and quantitative assessment of geosites and geodiversity sites: a review*. *Geoheritage*. s.l.:s.n.
- Carrasco, J., 2000. *La secuencia estratificada Valle Nevado de la Formación Farellones (Mioceno): química y metamorfismo de muy bajo grado.*, Santiago, Chile: (Inedito).
- 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 inversion south of the flat-slab segment, southern Central Andes, Chile (33°-36° S.L.)*. *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 15, p. 117-139., s.l.: s.n.
- Charrier, R., Farías, M. & MaksaeV, V., 2009. *Evolución tectónica, paleogeográfica y metalogénica durante el Cenozoico en los Andes de Chile norte y central e implicaciones para las regiones adyacentes de Bolivia y Argentina: Revista de la Asociación Geológica Argentina, v. 65, p. 05-35.*, s.l.: s.n.
- Charrier, R. y otros, 1994. *Nuevos antecedentes estratigráficos y estructurales para las Formaciones Coya-Machali y Abanico, entre 33° 50' y 35° S, Cordillera Principal Chilena. Actas XII Congreso Geológico Chileno, Concepción, p. 1316-1319.*, s.l.: s.n.
- Charrier, R. y otros, 1996. *New evidence for late Mesozoic - early Cenozoic evolution of the Chilean Andes in the upper Tinguiririca valley (35° S), Central Chile. Journal of South American Earth Sciences, Vol. 9, Nº 2, p. 1-30.*, s.l.: s.n.

- Costa, J., 1984. Physical geomorphology of debris flows. In *Developments and Applications of Geomorphology*. En: J. E. Costa & P. J. Fleisher, edits. *Developments and Applications of Geomorphology*. Berlin: Springer-Verlag, pp. 268-317.
- Cruden, D. & Varnes, D., 1996. *Landslide types and processes*, Washington D.C.: Special Report 247: Landslides: Investigation and Mitigation, Transportation Research Board.
- DeMets, C., Gordon, R., Argus, D. & Stein, S., 1994. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophysical Research Letters*, 21(20), pp. 2191-2194.
- Díez-Herrero, A., Laín-Huerta, L. & Lloremte-Isidro, M., 2008. *Mapas de Peligrosidad por avenidas e inundaciones: Guía metodológica para su elaboración*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España. Serie Riesgos Geológicos/Geotecnia No. 1, 190 pág.
- Esaki, T., Thapa, P., Mitani, Y. & Ikemi, H., 2005. *Landslide and debris flow characteristics and hazard mapping in mountain hillslope terrain using GIS, Central Nepal*. Vancouver, En: Eberhardt, E., Hungr, O., Fell, R., Couture, E. (eds), *Proceedings, International Conference on Landslide Risk Management*, p, s.l.: s.n.
- Farías, M. y otros, 2008. *Late Miocene high and rapid surface uplift and its erosional response in the Andes of central Chile (33°-35°S)*. *Tectonics* (27), TC 1005, doi:10.1029/2006TC002046., s.l.: s.n.
- Fock, A., 2005. *Cronología y tectónica de la exhumación en el Neógeno de los Andes de Chile central entre los 33° y los 34°S*. Thesis, Departamento de Geología, Universidad de Chile., s.l.: s.n.
- Fuenzalida, H., 1971. *Climatología de Chile*. Santiago, Chile: Universidad de Chile. Publicación Interna.
- Geoestudios, 2008. *Manual de glaciología, Volumen N°2*. Santiago: Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas.
- Giambiagi, L., Álvarez, P., Godoy, E. & Ramos, V., 2003. *The Control of pre-existing extensional structures on the evolution of the southern sector of the Aconcagua Fold and thrust belt, southern Andes*. *Tectonophysics*, Vol. 369. p. 1-19., s.l.: s.n.
- Giraud, R. & Shaw, L., 2007. *Landslide Susceptibility Map of Utah, s.l.: Utah Geological Survey, 16 p, s.l.: s.n.*
- Godoy, E. & Lara, L., 1994. *Segmentación estructural andina a los 33°-34°: nuevos datos en la Cordillera Principal*. *Actas VII Congreso Geológico Chileno, Concepción, Vol. 2, p. 1344-1348.*, s.l.: s.n.
- Godoy, E., Yáñez, G. & Vera, E., 1999. *Inversion of an Oligocene volcano-tectonic basin and uplifting of its superimposed Miocene magmatic arc in the Central Chilean Andes: first seismic and gravity evidences*. *Tectonophysics*, Vol. 306, N° 2, p. 217-236., s.l.: s.n.
- Gonzalez de Vallejo, L., Ferre, M. & Ortuño, L. & O., 2002. *Ingeniería Geológica. Segunda ed. Madrid: Pearson Educación.* s.l.:s.n.
- González-Ferrán, O., 1995. *Volcanes de Chile*. Santiago: Instituto Geográfico Militar, 410 pág.
- Hauser, A., 1985. Flujos aluvionales de 1870 y 1896 ocurridos en la ladera norte del volcán Yates, X Región: su implicancia en la evaluación de riesgos naturales. *Revista Geológica de Chile*, Volumen 25-26, pp. 125-133.

- Hauser, A., 1997. *Los aluviones del 18 de Junio de 1991 en Antofagasta: un análisis crítico, a 5 años del desastre*, Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín N° 49, 47 pág.
- Hauser, A., 2000. *Remociones en masa en Chile*. 2da ed. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín N° 59, versión actualizada, 89 pág.
- INFRACON y MLB, 2014. *Estudio de Riesgos y Protección Ambiental Plan Regulador Comunal de Lo Barnechea*, Santiago: s.n.
- Isacks, B., 1988. *Uplift of the central Andean plateau and bending of the Bolivian orocline*. *Journal of Geophysical Research* 93(B4), 3211-3231., s.l.: s.n.
- Jordan, T. y otros, 2001. *Extension and basin formation in the Southern Andes caused by increased convergence rate: A mid-Cenozoic trigger for the Andes*. *Tectonics*, Vol. 20, p. 308-324., s.l.: s.n.
- Kausel, E. & Ramírez, D., 1992. Relaciones entre parámetros focales y macrosísmicos de grandes terremotos chilenos. *Revista Geofísica*, Issue 37, pp. 159-194.
- Kay, S. & Kurtz, A., 1995. *Magmatic and tectonic characterization of the El Teniente region*. Informe Inédito para CODELCO Chile, 180 p., s.l.: s.n.
- Keeper, D., 1984. Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of América Bulletin*, 95(4), pp. 406-421.
- Keller, E. & Blodgett, R., 2004. *Riesgos Naturales*. Madrid: Pearson Education S.A., 448 pág.
- Klohn, C., 1960. *Geología de la Cordillera de Los Andes de Chile Central, Provincia de Santiago, O'higgins, Colchagua y Curicó*. Boletín N°8., Santiago, Chile: Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Lee, S., Choi, J. & Min, K., 2002. *Landslide susceptibility analysis and verification using the Bayesian probability model*. *Environmental Geology*, Vol. 43, N° 1-2, p. 120-131. s.l.:s.n.
- Loye, A., Jaboyedoff, M. & Pedrazzini, A., 2009. Identification of potential rockfall source areas at a regional scale using a DEM-based geomorphometric analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(5), pp. 1643-1653.
- Luca, R., 2001. *Avalanchas y sus condiciones nivometeorológicas en la Cordillera de Los Andes de Chile Central, bases para un modelo predictivo.*, Santiago, Chile: s.n.
- Marín, M. & Garrido, N., 2012. *Remociones en masa ocurridas el 15 de Enero de 2012 en el camino interior del Parque Cordillera, Yerba Loca, comuna de Lo Barnechea, región metropolitana de Santiago*, Santiago: Informe Inédito Sernageomin.
- 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.
- Mears, A., 1979. *Colorado Snow-Avalanche Area Studies and Guidelines for Avalanche-Hazard Planning*, Denver: Colorado Geological Survey. Dept. of Natural Resources. Special Publication 7. 125 pág.. s.l.:s.n.
- Mears, A., 1992. *Snow-Avalanche Hazard Analysis for Land-Use Planning and Engineering*, Denver, Colorado: Boletín 49. Colorado Geological Survey, Department of Natural Resources. 55 pág.. s.l.:s.n.
- Michoud et al., 2012. Rockfall hazard and risk assessments along roads at a regional scale: example in Swiss Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 123(3), pp. 615-619..

- Miller, A., 1976. *The Climate of Chile. World Survey of Climatology. Elsevier Scientific Publishing Company. Vol 12, pág. 113-147.. s.l.:s.n.*
- Moreno, H., 1993. *Erupciones volcánicas en Chile: procesos y riesgos asociados. s.l., I Jornadas Nacionales de Vulcanología, Medio Ambiente y Defensa Civil. Pág. 161-170.*
- 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.*
- Municipalidad de Contulmo, 2009. *Plan Regulador Comunal de Contulmo, s.l.: s.n.*
- 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.*
- Orozco, G., Amigo, A., Bertin, D. & Lara, L., 2013. *Peligros Volcánicos de la Zona Central de Chile, Regiones Metropolitana, del Libertador General Bernardo O'Higgins, del Maule y del Biobío. SERNAGEOMIN, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental, XX p., 1 mapa en 3 hojas escala 1:250.000, s.l.: s.n.*
- Pereira et al., 2007. *Avalacao do Património Geomorfológico: proposta de metodologia. Publicacoes da Assiacao Portuguesa de Geomorfólogos, 5: 235-247.. s.l.:s.n.*
- Pérez et al., 2013. Improving seismotectonics and seismic hazard assessment along the San Ramón Fault at the eastern border of Santiago city, Chile. *Natural Hazards*, pp. Available at: <http://link.springer.com/article/10.1007/s11069-013-0908-3/f>.
- Petit-Breuilh, M., 2001. *Desastres naturales y ocupación del territorio en hispanoamérica [Siglos XVI al XX]., s.l.: Universidad de Huelva, Arias Montano (n.70): 341 p., il, Huelva. .*
- Petit-Breuilh, M. E., 2004. *La historia eruptiva de los volcanes hispanoamericanos (siglos XVI al XX). Serie Casa de los Volcanes Nº8, Exmo. Cabildo Insular de Lanzarote, España, 431 p, s.l.: s.n.*
- Petit-Breuilh, M. E., 2011. *Informe crítico de la cronología eruptiva del volcán San José (33°45'S), Chile. Departamento de Historia de América, Universidad de Sevilla. 3 p., s.l.: s.n.*
- 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..*
- PMA-GCA, 2008. Proyecto Multinacional Andino: Geociencia para las Comunidades Andinas. (PMA-GCA). Atlas de deformaciones cuaternarias de los Andes. Servicio Nacional de Geología y Minería. *Publicación Geológica Multinacional, 1 mapa en CD-ROM, Issue 7, p. 320.*
- Quiroga, R., 2013. *Análisis estructural de los depósitos cenozoicos de la cordillera Principal entre el cerro Provincia y el cordón el Quempe, Región Metropolitana, Chile (33°18' y 33°25'S). Memoria, Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago., s.l.: s.n.*

- Rauld, R., 2002. *Análisis morfoestructural del frente cordillerano de Santiago oriente, entre el Río Mapocho y la Quebrada de Macul*, s.l.: Memoria de título de geólogo. Departamento de Geología. Universidad de Chile..
- Rauld, R., 2011. *Deformación cortical y peligro sísmico asociado a la falla San Ramón en el frente cordillerano de Santiago, Chile Central (33°S)*, s.l.: Tesis para Doctor en Ciencias mención Geología. Universidad de Chile..
- Rodríguez, C., 2013. *Patrimonio geológico en la ciudad de Santiago: caracterización y valoración de geosítios en torno a un núcleo urbano. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile. Santiago. 156 p.. s.l.:s.n.*
- Sancho, C., 1997. Los mapas de riesgos. En: J. Peña, ed. *Cartografía geomorfológica básica y aplicada*. Zaragoza: Geomorfa, pp. 181-200.
- Schaetzl, R. & Anderson, S., 2005. *Soils Genesis and Geomorphology*. New York: Cambridge University Press.
- Scholz, C., 1990. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. Cambridge: Cambridge University Press, 439 pág.
- Selby, M., 1993. *Hillslope materials and processes, 2° edition..* New York: Oxford University Press.
- Sellés, D. & Gana, P., 2001. *Geología del área Talagante-San Francisco de Mostaza. Escala 1:100000. Servicio Nacional de Geología y Minería, Serie Geología Básica, 4., s.l.: s.n.*
- Sepúlveda, S., Murphy, W., Jibson, R. & Petley, D., 2005. Seismically-induced Rock Slope Failures Resulting from Topographic Amplification of Strong Ground Motions: The Case of Pacoima Canyon, California.. *Engineering Geology*, Volumen 80, pp. 336-348.
- Sepúlveda, S. 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. Publicación Geológica Digital, N°4., Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería..*
- Silva, C. & Bertin, D., 2012. *Mapa Preliminar de Peligros Volcánicos - Volcán Tupungatito. Escala 1:100.000. Informe Inédito, Programa de Riesgo Volcánico. Subdirección Nacional de Geología. s.l.:s.n.*
- Somoza, R., 1998. Updated Nazca (Farallon)- South America relative motions during the last 40 My: implication for mountain building in the central Andean region.. *Journal of South American Earth Sciences*, Issue 11, pp. 211-215.
- Sruoga, P., 2002. *El volcanismo reciente y riesgo asociado en la Provincia de Mendoza, Mendoza: IANIGLA, 30 Años de Investigación Básica y Aplicada en Ciencias Ambientales*, pág. 255-259.
- Stern, C. y otros, 1994. Petrochemistry and age of rhyolitic pyroclastic flows which occur along the drainage valleys of the rio Maipo and rio Cachapoal (Chile) and rio Yaucha and rio Papagayos (Argentina). *Revista Geológica de Chile*, Issue 23, pp. 39-52.
- Tassara, A. G. H.-J. S. S. & Hackney, R., 2006. Three dimensional density model of the Nazca plate and the Andean continental margin.. *Journal of Geophysical Research*, 111(B9), p. B09404..
- Thiele, R., 1980. *Hoja Santiago, Región Metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile (29), 21p., s.l.: s.n.*

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.

Watt, S., 2010. *Records of volcanism and controls on volcanic processes in southern Chile.* , Oxford: Ph.D. Thesis. Worcester College and the Department of Earth Sciences, University of Oxford..

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

ANEXO SS Definiciones de peligro y riesgo usadas en este estudio

Los procesos geodinámicos producen modificaciones de diversas magnitudes en la superficie terrestre que constituyen peligros geológicos que afectan de forma directa o indirecta las actividades humanas. Se entiende como **Peligro Natural** a cualquier fenómeno de origen natural que puede tener efectos negativos en el territorio (personas, infraestructura, medio ambiente, etc.). Los peligros naturales pueden subdividirse en distintas categorías: geológicos, hidrológicos, climáticos, incendios, etc.

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

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

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

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

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

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

* 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

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

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

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

Donde R_t corresponde al riesgo total, R_e al riesgo específico y E a los elementos expuestos considerados. La FIGURA SS-1 muestra la relación entre el conocimiento y la estimación de la susceptibilidad, amenaza y riesgo.

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

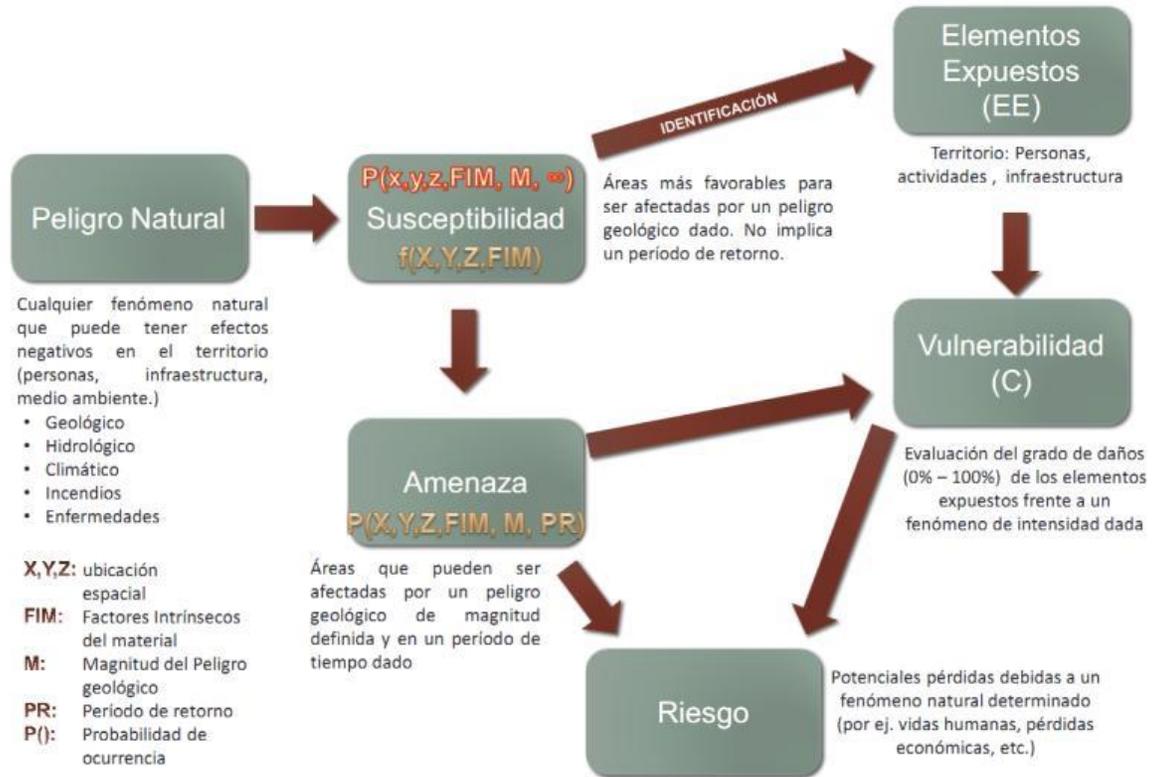
En resumen, los peligros geológicos pueden analizarse desde el punto de vista de las condiciones intrínsecas del material (estudios de susceptibilidad o determinísticos) y desde el punto de vista de los factores desencadenantes de un fenómeno (estudios de amenaza o probabilísticos). Considerando que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

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

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

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

FIGURA SS-1 Etapas de la evaluación de un evento geológico peligroso



Fuente: Elaboración propia basado en Varnes (1984)

SS.1 Referencias

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

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

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

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

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..

SUBDERE, 2011. *Guía Análisis de Riesgos Naturales para el Ordenamiento Territorial*, Santiago: Subsecretaría de Desarrollo Regional.

USGS, 2008. *The landslide handbook—A guide to understanding landslides*, Reston, Virginia: U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 p.

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

ANEXO TT Descripción de los peligros geológicos analizados

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

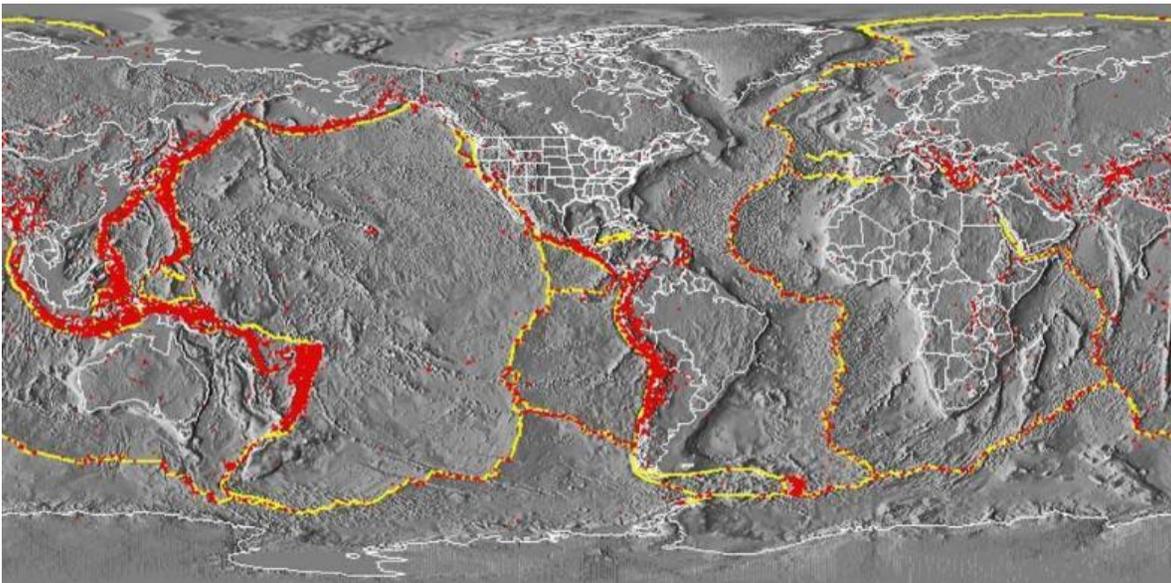
Para cada peligro, se describe en qué consiste, cuáles son sus factores condicionantes, y los principales efectos para la población y sus actividades. El análisis se realiza dividiendo los peligros geológicos en dos grupos, procesos internos o endógenos de la tierra (peligro sísmico y volcánico), y los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

TT.1 Procesos Internos o Endógenos de la Tierra

TT.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 TT-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 TT-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

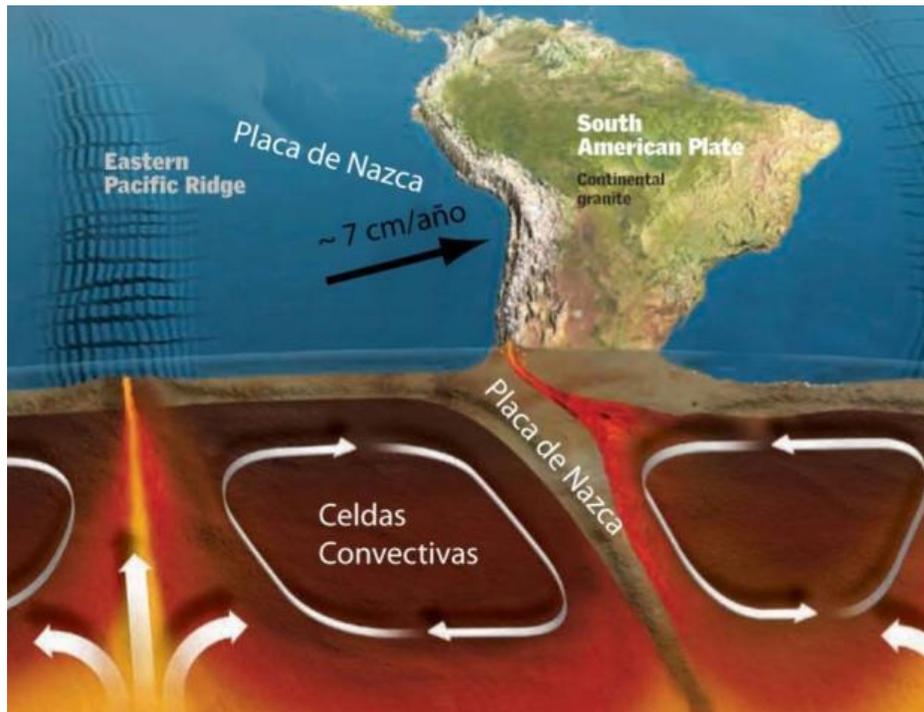


Fuente: Western Washington University (2011).

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



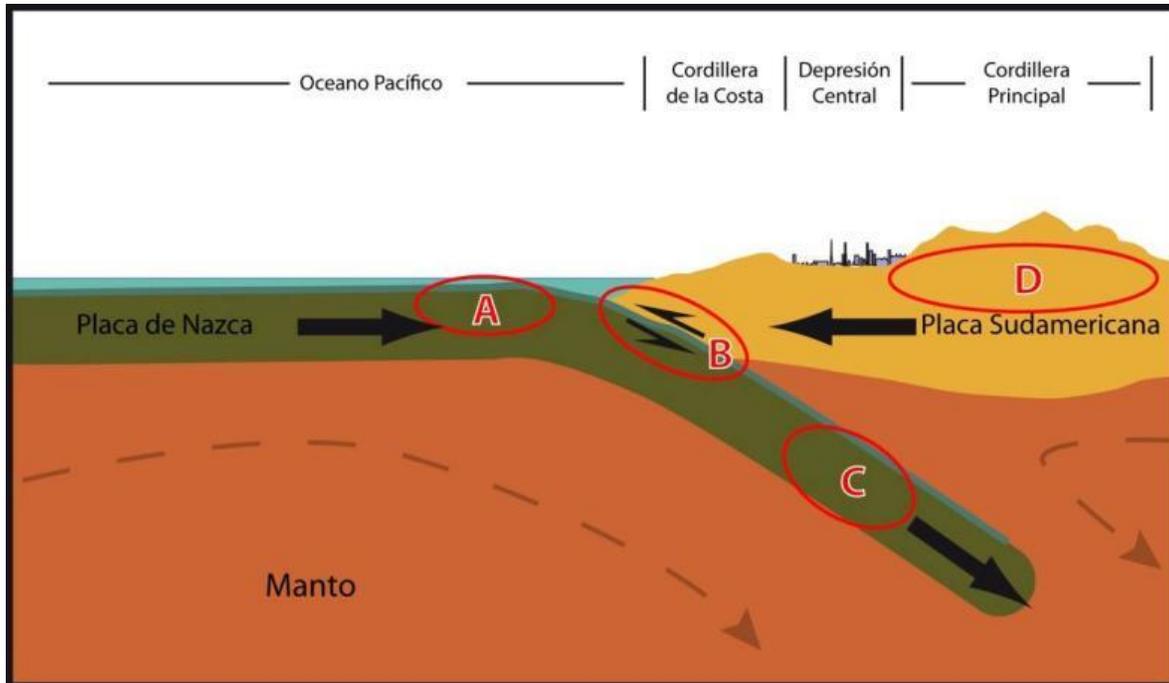
Fuente: Modificado de Enciclopedia Britannica (2008).

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 TT-3, que corresponde a:

- Zona A: Sismos “Costa afuera”, que se producen por los esfuerzos extensivos por abombamiento en la placa subductante antes de la zona de contacto. A pesar de llegar a tener magnitudes cercanas a $M_w = 6$, prácticamente no causan efectos significativos en áreas pobladas debido a su ocurrencia en zonas mar adentro.
- Zona B: Sismos asociados al contacto interplaca, como los ocurridos en Antofagasta 1995, Chile Central 1985, Mejillones 2005 y Constitución-Concepción en el 2010. Estos son producto de la liberación de energía acumulada por la convergencia de placas.
- Zona C: Sismos intraplaca de profundidad intermedia, como los sismos de Punitaqui 1997, Copiapó 2002, Calama 1950, Tarapacá 2005 y Chillán 1939. Se producen por el fracturamiento tensional de la placa de Nazca (la placa se quiebra por su propio peso).
- Zona D: Sismos superficiales intraplaca, como los sismos de Las Melosas en 1958, Aroma en 2001, Curicó en 2004 y Aysén, 2007. Son producto del esfuerzo intraplaca inducido por la subducción, que a la vez contribuye a la generación de relieve. En general, los sismos

superficiales intraplaca se encuentran asociados a fallas superficiales que pueden tener movimientos normales, inversos y de rumbo, que responden a campos de esfuerzos compresivos o extensivos.

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

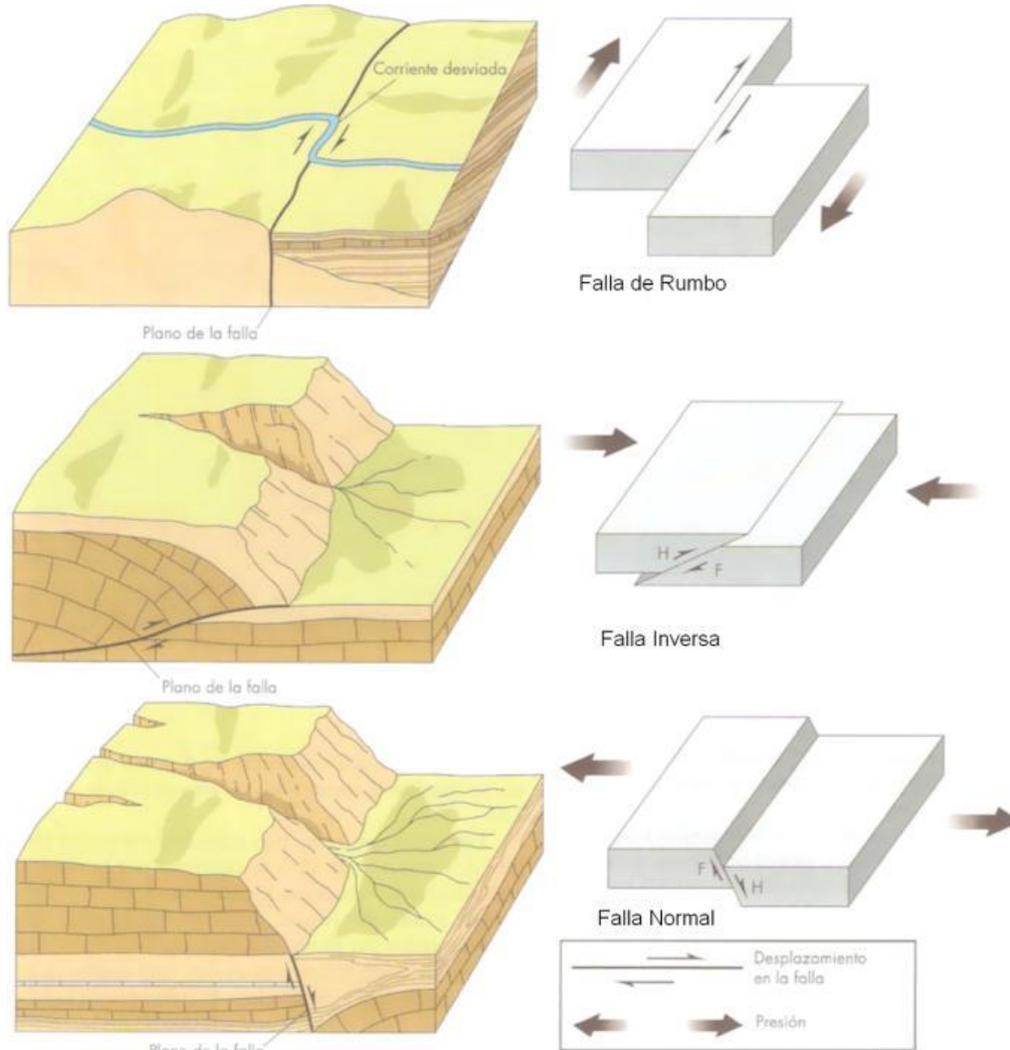


Fuente: Elaboración propia.

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 TT-4). A su vez, esta ruptura conlleva una liberación de energía que se propaga por medio de ondas sísmicas.

Las ondas que transmiten la energía sísmica se agrupan en dos tipos principales: ondas de cuerpo y ondas de superficie. Las primeras se dividen en ondas P (compresivas) y ondas S (ondas de corte o de cizalle), mientras que las segundas se dividen en ondas Rayleigh y Love (FIGURA TT-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 TT-4 Tipos de Falla y esfuerzos asociados

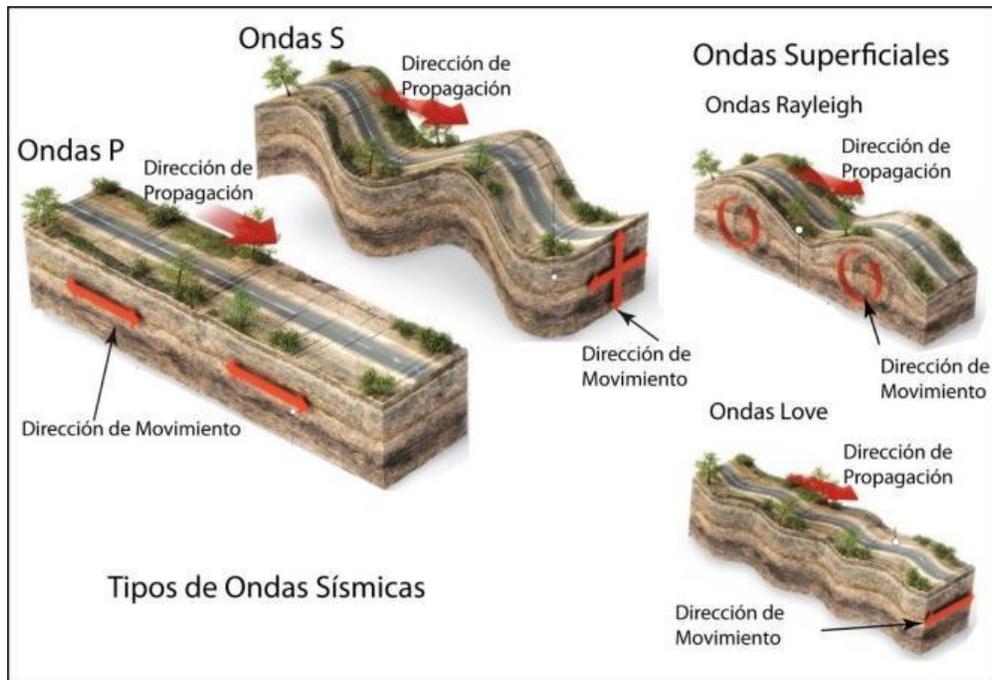


Fuente: Keller y Blodgett (2004).

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

Finalmente, debe destacarse el llamado “efecto sitio”, que indica un condicionamiento de carácter local bajo el cual para un mismo terremoto y dependiendo del tipo de terreno donde uno se encuentra ubicado, las ondas sísmicas pueden amplificarse durante el desarrollo del terremoto (FIGURA TT-6).

FIGURA TT-5 Tipos de ondas sísmicas

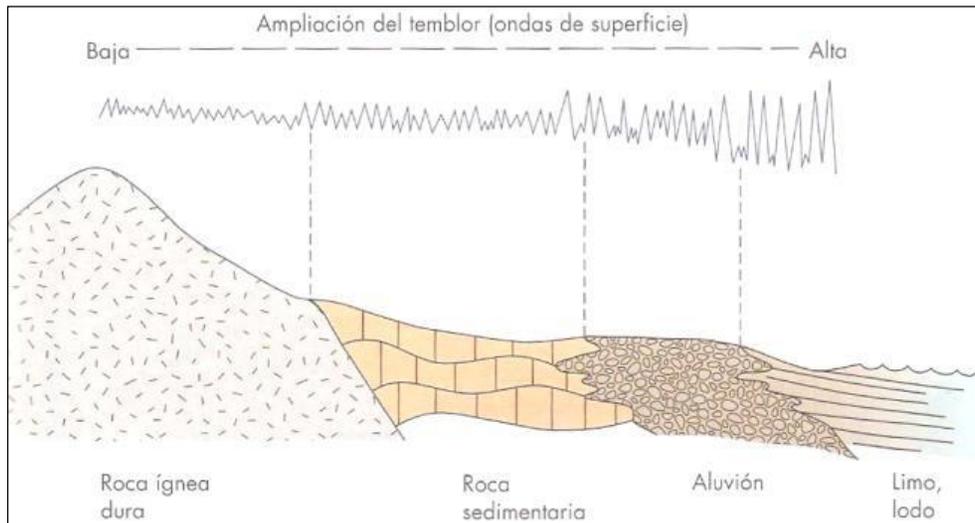


Fuente: Modificado de Enciclopedia Britannica (2008).

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

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

Los deslizamientos y derrumbes se dan en diversos tipos de suelos y bajo variadas condiciones sismotectónicas, incluso se han detectado en sismos de grado $M_w = 4.0$. La cantidad y severidad de estos están en directa relación con la cercanía al epicentro y la magnitud del evento causante Keeper (1984); Sepúlveda, et al. (2005); (2010). Sea cual sea su origen, los deslizamientos y derrumbes están asociados principalmente a tres factores: las pendientes del terreno, la resistencia mecánica de los materiales involucrados y antecedentes de eventos anteriores (Centeno, et al. (1994); Sancho (1997)). Para más detalle acerca de estos procesos ver el Anexo TT.2.2 "Procesos de Remoción en Masa".

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

Fuente: Keller y Blodgett (2004).

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

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

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

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

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

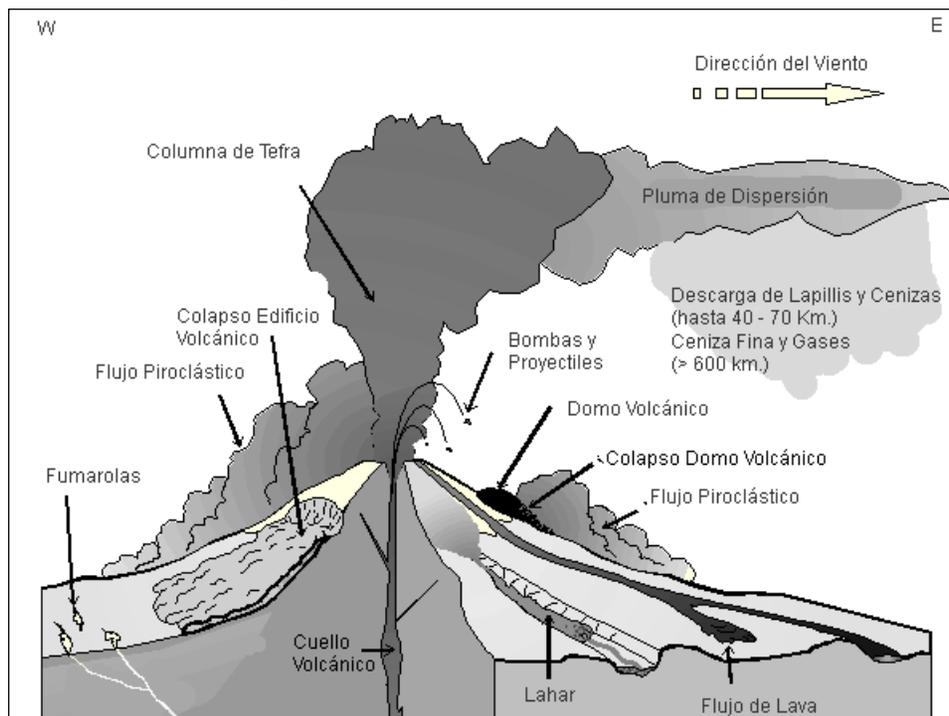
Fuertes movimientos sísmicos, durante los cuales las ondas sísmicas aumentan la presión del agua contenida en los depósitos. Cabe destacar, que todo Chile, en especial desde la península de Taitao al norte, tiene el potencial de ser afectado por grandes terremotos.

TT.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 lo largo de la Cordillera de los Andes, pero de forma discontinua. En la zona entre los 18° y 27°S y aquella al sur de los 33°S se ubica el volcanismo activo, mientras que entre los 27°-33°S está ausente. Los principales peligros asociados a una erupción volcánica se resumen en la FIGURA TT-7 y en el CUADRO TT-1.

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

FIGURA TT-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 (M_w), 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 descende 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 TT-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:

4. Pérdida de tierras cultivables
5. Colapso de techos y obras civiles
6. Pérdidas de vidas humanas y forraje
7. 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.

TT.2 Procesos Exógenos o Externos de la Tierra

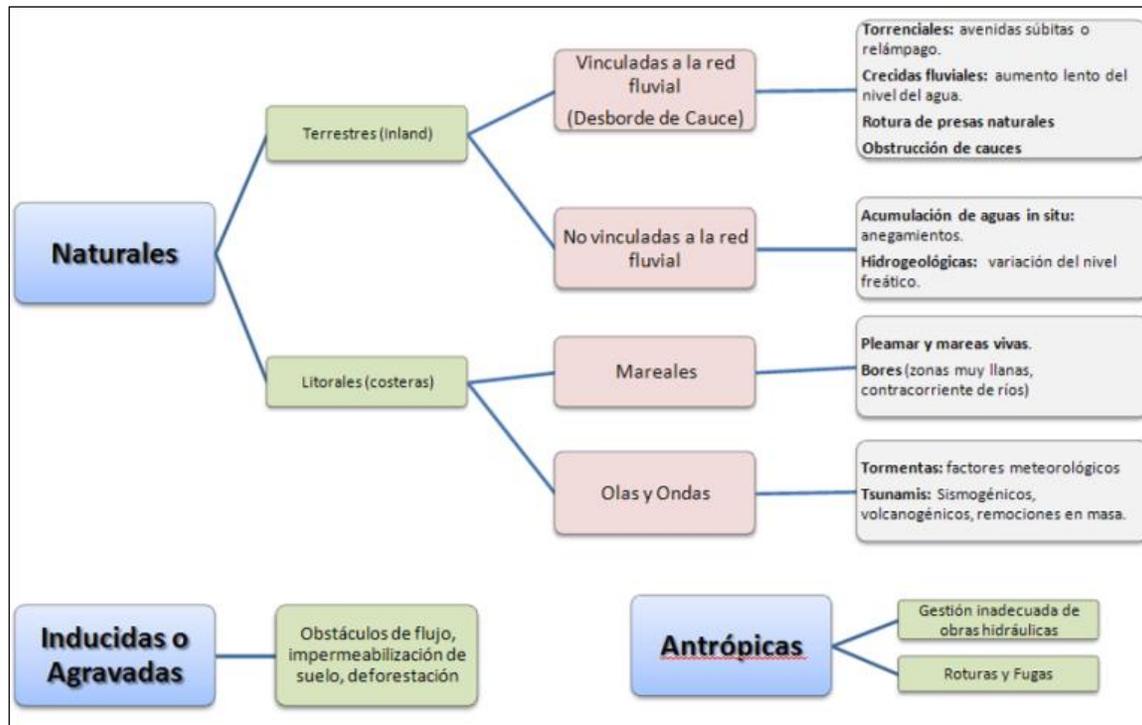
TT.2.1 Inundaciones Terrestres y Litorales

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

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

FIGURA TT-8 Clasificación de los tipos de inundaciones



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

TT.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:

8. 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.
9. 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:

10. 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.
11. La intensidad y velocidad con que ocurre el fenómeno
12. 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.

TT.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.

TT.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 TT-9). El movimiento de estos materiales puede ser por caída, volcamiento, deslizamiento, propagación lateral o flujo (PMA-GCA, 2007).

TT.2.2.1 *Desprendimientos o Caída de Rocas*

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

profundas, labradas en secuencias estratificadas con niveles más duros hacia el techo, expuestas a erosión fluvial, o acantilados costeros expuestos a erosión marina.

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

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

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

TT.2.2.2 *Deslizamientos*

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

Estos fenómenos pueden ocurrir de varias formas dependiendo de las propiedades del material y las características geológicas y geomorfológicas del entorno, siendo principalmente divididos en rotacionales y traslacionales (FIGURA TT-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 TT-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.

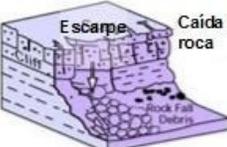
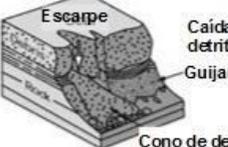
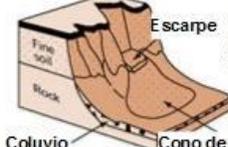
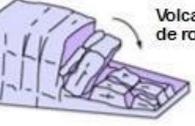
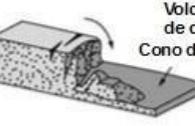
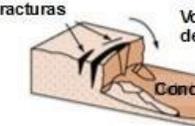
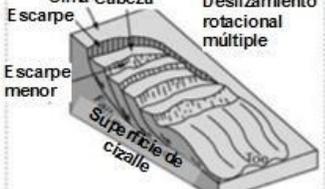
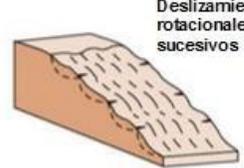
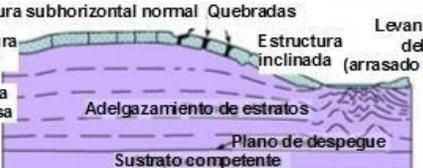
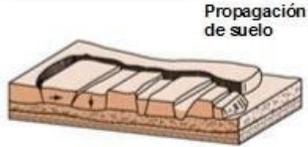
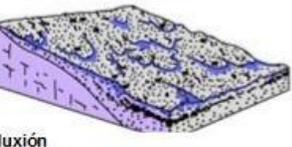
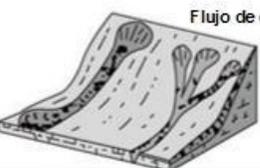
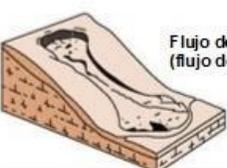
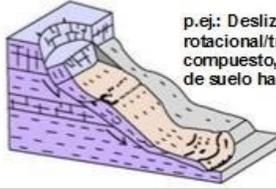
Por otro lado, estos fenómenos pueden ser generados por factores externos, denominados factores desencadenantes o gatillantes, tales como eventos hidrometeorológicos, sísmicos y actividad antrópica (excavaciones para caminos, canales, terraplenes, etc.).

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:

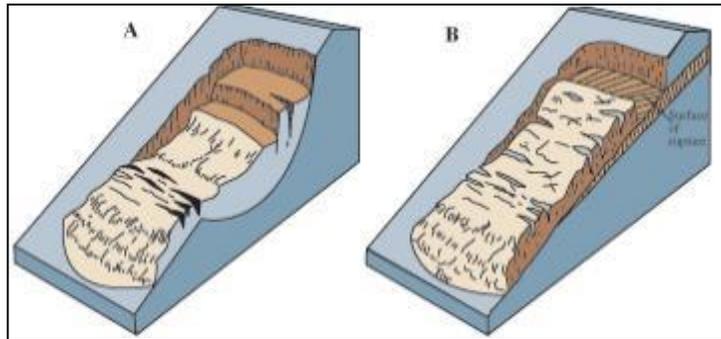
1. Distancia al origen del fenómeno: Por lo general, los deslizamientos son procesos que afectan un área limitada (radios menores a 1 km., incluso menores a 500 m). Hay que considerar que este punto depende directamente del tamaño de volumen desplazado.
2. La intensidad y velocidad con que ocurre el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

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

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

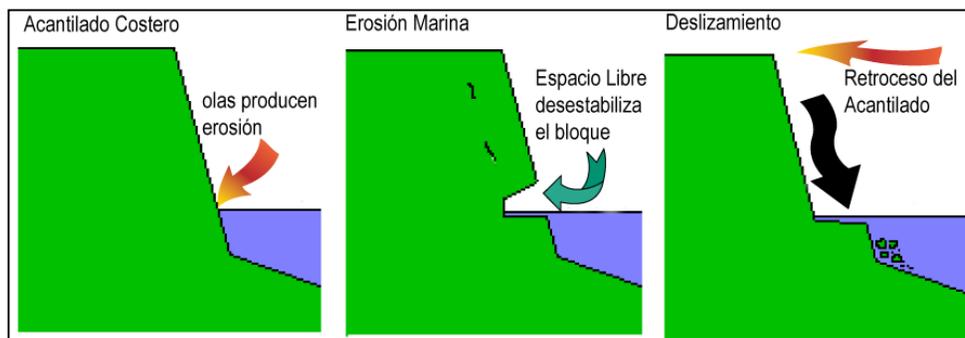
Fuente: Clasificación utilizada por el British Geological Service, modificada de (Varnes, 1978) y (Cruden & Varnes, 1996).
 Disponible en: http://www.bgs.ac.uk/landslides/how_does_BGS_classify_landslides.html

FIGURA TT-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 TT-11 Ejemplo de erosión por retroceso de terrazas, aplicado al desarrollo de planicies de abrasión



Fuente: Elaboración propia.

TT.2.2.3 Flujos de Detritos y Barro

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

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

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

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

Los flujos o “aluviones” del 18 de Junio de 1991 en Antofagasta y del 3 de Mayo de 1993 en la Quebrada de Macul en Santiago Oriente son ejemplos de eventos que han suscitado el interés nacional tanto por el alto grado de daños materiales como el costo de vidas humanas. Estos eventos han sido, por otra parte, un aporte para el conocimiento de los umbrales de intensidad de precipitaciones mínimas para la generación de flujos de detritos en Chile. En el caso de Antofagasta, en una de las zonas más secas del país, se estimaron precipitaciones mínimas de 30 mm en 24 horas para la generación de flujos de detritos (Hauser, 1997). En el caso de Santiago Oriente, se contó con datos pluviográficos más precisos, donde se registraron casi 10 mm en una sola hora (Naranjo & Varela, 1996). Anteriormente, para la Región Metropolitana se estimó un mínimo de 60 mm en 24 horas para la generación de flujos de detritos (Hauser, 1985).

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

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

1. Tiempo de aviso: Los sistemas de emergencia y alerta a la población disminuyen considerablemente la vulnerabilidad social. Si se tienen mediciones continuas de la intensidad de precipitación, será posible alertar a la población de que existe la posibilidad de que se genere un flujo, entregando quizás minutos valiosos que podrían salvar vidas.
2. Distancia al origen del fenómeno: Mientras más alejado sea el origen, y si se cuenta con sistemas de emergencia y alerta a la población, se puede disminuir la vulnerabilidad social.
3. La intensidad y velocidad con que ocurre el fenómeno (tamaño del flujo): Un flujo de mayor tamaño y rápido tiene mayor capacidad de afectar a una población que uno más pequeño y lento.
4. Densidad de población en la zona susceptible a ser afectada: En caso de que la población se encuentre directamente en el cauce del flujo, los daños pueden ser catastróficos, ya que pueden producirse muertes, heridos, enfermedades, daños estructurales mayores, etc., tal como ocurrió en los casos de Antofagasta (1991) y Quebrada de Macul (1993). Si el cauce no afecta directamente a la población, pueden producirse cortes de caminos y daños a la infraestructura sanitaria (por ejemplo, destrucción de captaciones de agua para el consumo humano), lo que se traduce en un costo económico en reparaciones y medidas de mitigación.

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

TT.2.2.4 *Avalanchas de Nieve*

Las avalanchas de nieve son desprendimientos de masas de nieve que pueden llevar rocas, árboles, tierra y hielo; y que pueden alcanzar grandes volúmenes y velocidades (entre 50 a 300 km/hr).

Son altamente destructivas y su longitud puede ir desde pocos metros hasta 3.000 m; y tienen la capacidad de remontar relieve (es decir, descender por una ladera, y sube por la ladera opuesta y retorna). Una avalancha tiene tres zonas: Inicio, Recorrido y Depósito. Para que las avalanchas se produzcan deben existir varios factores asociados: como relieve, pendiente de la ladera (se producen principalmente entre 25° y 50° (Mears 1979, 1992), lo que no significa, que en otros ángulos no existan), clima, manto de nieve, cantidad de precipitación, temperaturas, vientos y sus direcciones, metamorfismo de la nieve, exposición solar, entre otros.

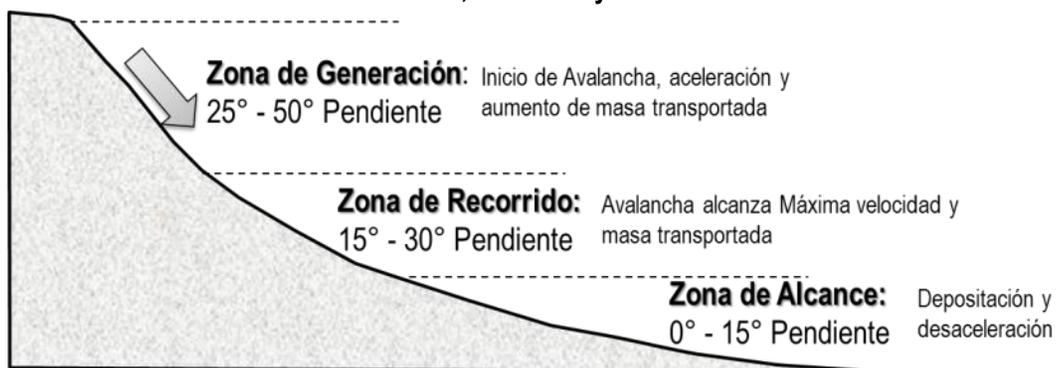
TT.2.2.4.1 *Tipos de Avalanchas*

Generalmente las avalanchas se generan por pérdida de cohesión del manto de nieve, pero pueden ser provocadas por esquiadores, montañistas, animales, temblores, movimientos de terreno, maquinaria, etc. Se identifican 3 tipos de avalanchas principales:

TT.2.2.4.1.1 *Avalancha de nieve nueva o reciente*

Corresponde a avalanchas cuya nieve tiene muy poca cohesión, se forman cerca de la superficie y una vez que se inician, la nieve se ve arrastrada. Este tipo de nieve puede ser seca o húmeda, lo que es traducido en menor o mayor cantidad de agua y del componente aire v/s la porosidad de la nieve. Las avalanchas de nieve nueva, con nieve húmeda, serán más masivas y sus densidades serán inferiores a 200 kg/m³. Normalmente estas avalanchas caen durante el temporal y se debe al ángulo de la pendiente, que excede el ángulo crítico, traducido en ángulo de reposo o ángulo de fricción estática preciso para que se inicie el movimiento.

FIGURA TT-12 Zonas de Generación, Recorrido y Alcance de una avalancha de nieve.



Fuente: Modificado de Mears (1992).

TT.2.2.4.1.2 Avalancha de placa dura

Este tipo de avalancha, en que la nieve tiene mayor cohesión, es más peligrosa y se inicia debido a una falla en el interior del manto de nieve. Se forma un bloque de nieve rectangular y con líneas de fractura que lo separan de la ladera. La “avalancha de placa” puede ser seca o húmeda; mixta; dura y/o blanda. Las densidades medias en este tipo de avalancha van de 100 a 300 kg/m³

TT.2.2.4.1.3 Avalancha húmeda:

Se caracterizan por la parcial o total saturación de agua dentro del manto de nieve. Estas pueden ocurrir de preferencia en primavera y en cualquier período invernal, al caer una lluvia sobre el manto. Existen varias razones para que se produzcan estas avalanchas, como la fusión de la nieve por efecto del sol y fuertes gradientes de temperaturas del manto. En la mayoría de los casos existe escarcha de profundidad en la base. Dentro de las características más importantes está la reducción de la cohesión de la nieve, producto del agua, y la reducción de la fricción en la resistencia de la nieve. En mediciones efectuadas a depósitos de Avalancha de Nieve Húmeda se han obtenido densidades entre 900 y sobre los 1.000 kg/m³, lo que hace que este tipo de avalancha sea altamente destructiva, debido a sus altísimas fuerzas de impacto.

TT.2.2.4.2 Zonas de una senda de avalancha

El proceso de avalancha describe e identifica el fenómeno por el cual se producen caída de grandes masas de nieve desde las partes altas de una ladera. Este proceso depende de varios factores dentro de los cuales se puede mencionar el espesor total acumulado, la falta de homogeneidad de la capa de nieve, la existencia de discontinuidades entre los límites de capas físicamente diferentes dentro del manto de nieve, de un agente que facilita el deslizamiento de una de ellas sobre otra subyacente, de la temperatura, radiación, viento entre otros.

Se define Senda de Avalanchas como las porciones de cuenca hidrográfica donde puedan generarse avalanchas, en las cuales existe diferentes zonas: Zona de Origen o Inicio, Zona de Intermedia de Recorrido o Transición y Zona de Depositación o Despliegue para las trayectorias de caída de las diversas avalanchas que puedan generarse (FIGURA TT-13).

Zona de Origen o Inicio: Es la zona donde el manto de nieve pierde estabilidad y se produce la ruptura inicial y comienza a moverse ladera abajo. Esto ocurre en el área superior de la senda. El rango de pendiente en este sector por lo general está entre 27° y 45°.

El comienzo de una avalancha no está restringido a un terreno con características morfológicas específicas. Estas pueden originarse y fluir en quebradas estrechas, laderas amplias, abiertas y de pendientes uniformes o incluso en riscos y penachos.

Para pendientes menores de 25° la factibilidad de que se generen avalanchas está condicionado a ciertos factores, como por ejemplo, que el manto de nieve sea inestable debido a precipitaciones sólidas fuertes, alto contenido de agua libre, aumento de temperatura, o condiciones de dirección del viento.

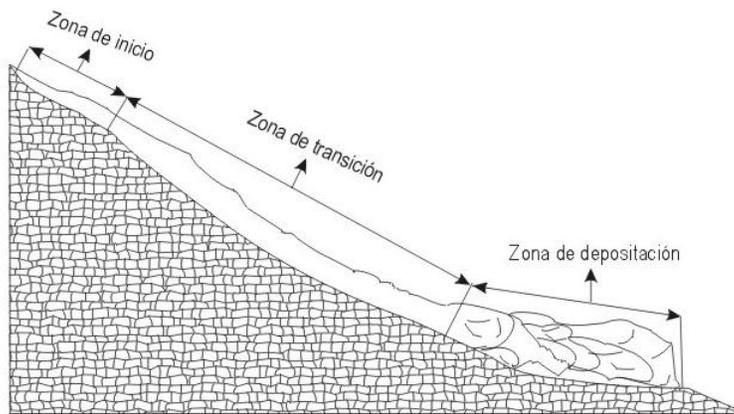
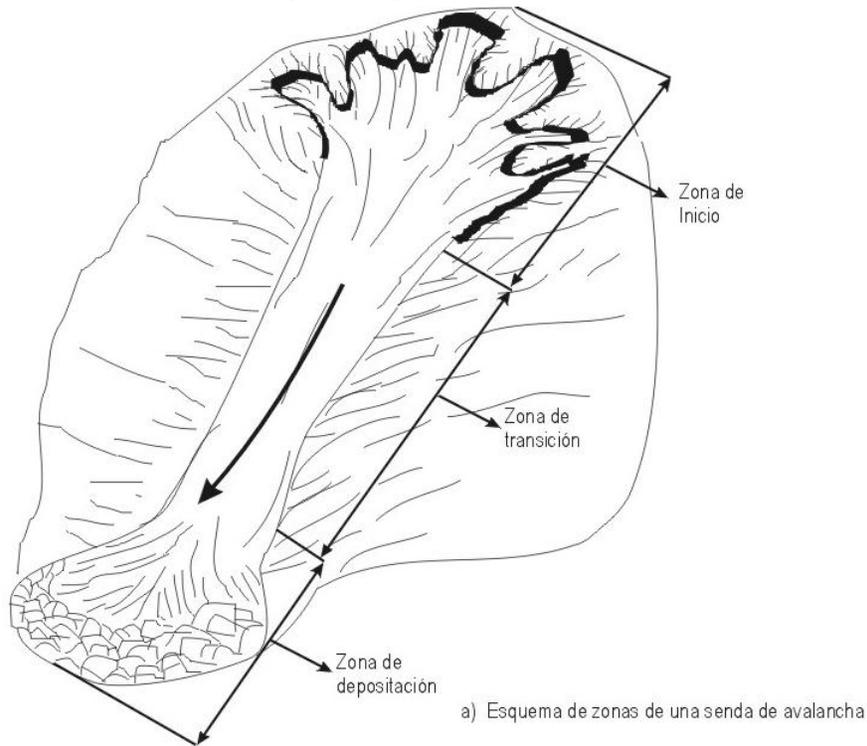
Zona Intermedia de Recorrido o Transición: Esta zona puede ser abierta o confinada lateralmente por flancos en los casos de gargantas o quebradas. En esta zona la avalancha tiene una velocidad variable y puede alcanzar su máximo, mantenerse o detenerse.

El rango de pendientes de esta zona por lo general está entre 18° y 25°. Con estos ángulos una avalancha no se originaría ni tampoco se detendría. La zona intermedia puede tener varias o sólo una

afluente. El caso más común es el de una quebrada alimentada por varios canales secundarios (quebradas secundarias), las cuales a su vez, son zonas intermedias de sendas de avalanchas. Por lo general en esta zona no hay depósitos visibles a excepción de la nieve retenida por la rugosidad del terreno o extremos exteriores, por cambios bruscos de dirección o de pendientes.

Zona de Depósito o Despliegue: Es el área donde se produce una desaceleración de la avalancha y se genera su depositación natural y su eventual detención. Se puede presentar un abrupto cambio en el ángulo de pendiente entre la zona intermedia y ésta. Pero el límite con esta zona puede cambiar considerablemente entre una y otra avalancha para un mismo recorrido, ya que, depende de las características o calidad de la nieve (seca, húmeda, etc.) y del espesor del manto de nieve involucrado en la avalancha. Esta zona puede presentar una amplia gama de pendientes incluso invertidas con respecto al flujo de la avalancha. La longitud de esta zona puede alcanzar entre unos 300 a 500 m en pendientes entre 5° y 10°.

FIGURA TT-13 Esquema explicativo de una senda de avalancha



Fuente: Manual de Carreteras (MOP, 2013)

TT.2.2.4.3 Parámetros utilizados para la determinación de las causas detonantes de Avalanchas de Nieve respecto del aspecto de una ladera

TT.2.2.4.3.1 Geomorfología

Dentro de este agente se agrupan los efectos geométricos de estabilidad producto del modelado de las laderas. La pendiente, la forma y la rugosidad son las principales características geomorfológicas

que influyen en el fenómeno. Para el análisis de las primeras se debe construir un Mapa de pendientes basado en los rangos que se presentan en las definiciones siguientes:

Se reconocen tres rangos importantes en el análisis: entre 0° y 20°, entre 20° y 50° y entre 50° y 90°, cada uno con implicaciones respecto a la frecuencia de deslizamientos de nieve y de avalanchas. A continuación se explican en forma detallada.

Rango 1 (entre 0° y 20°): En este rango de pendiente la ocurrencia de deslizamientos de nieve y avalanchas es rara. Cuando ocurren se presentan en épocas de lluvia o al inicio de la primavera, donde la capa de nieve se encuentra húmeda.

Rango 2 (entre 20° y 50°): Las laderas que se encuentran en este rango de pendientes se concentra la mayor probabilidad de presentar fenómenos de avalancha y de deslizamientos de nieve. En el rango entre 20° y 30° dichos procesos se consideran ocasionales, entre 30° y 40° se presenta la mayor frecuencia y entre 40° y 50° son frecuentes. La nieve deslizada en estos eventos generalmente corresponde a nieve seca, con variaciones de densidad asociadas al clima.

Rango 3 (entre 50° y 90°): Las laderas que presentan este rango de pendientes tienen menor capacidad de acumulación de nieve por lo que los procesos que presentan son persistentes pero con volúmenes de nieve menores comunes y mayores ocasionales (entre 50° y 60°) y mayores raros (60° y 70°). Entre 70° y 90° solo se presentan eventos asociados a desprendimientos desde las cornisas.

La condición de pendiente de cada una de las sendas de avalancha identificadas dentro del área de estudio define la probabilidad de ocurrencia de avalanchas. De este modo, una senda de avalancha con mayor área en el rango de pendientes N° 2 incrementa la probabilidad de ocurrencia del fenómeno.

La forma está referida al tipo de ladera: cóncava, convexa o mixta. Las laderas cóncavas tienden a acumular mayores espesores de nieve, especialmente hacia la base de las mismas. Las laderas convexas acumulan espesores de nieve menores pero favorecen en mayor medida el deslizamiento. Cuando se presentan laderas mixtas aumenta la probabilidad de ocurrencia dado que hay zonas de acumulación y de descenso.

Esto permite establecer la capacidad de acumulación en cada una de las sendas de avalanchas identificadas en la zona de estudio. De este modo las sendas con una mayor capacidad de acumulación de nieve serán más susceptibles a la ocurrencia del proceso.

La rugosidad del terreno es un factor muy importante en el análisis, se entiende que un terreno más rugoso actúa como anclaje para la capa de nieve y favorece la acumulación de mayores espesores, los terrenos uniformes no permiten la acumulación de espesores considerables y favorecen el deslizamiento de la misma. Se puede considerar que las avalanchas se inician cuando la acumulación de nieve en los valles durante una tormenta excede de 0,5 m si es que no hay nieve preexistente en las sendas, o bien de 0,3 m si es que ya existe nieve en las sendas, producto de nevadas anteriores (Manual de Carretera, MOP 2013).

TT.2.2.4.3.2 Distribución del Manto de nieve en la zona de estudio

La distribución y extensión del manto de nieve se determina esencialmente por: (i) observación directa de actividad en una senda de avalancha o en el área, (ii) por antecedentes de estaciones meteorológicas, (iii) por información de imágenes satelitales y otras formas de sensores remotos. Las avalanchas no se producen hasta que, primero, la irregularidades del terreno tales como arbustos o rocas sean completamente cubiertas por la nieve y, luego, se deposite una cantidad tal de nieve que

permita al manto deslizarse sobre esta superficie relativamente suavizada. En zonas montañosas esto significa que se requieren a lo menos 0,5 m de nieve sobre el suelo natural de las zonas de inicio de avalanchas para que comiencen los chorreos y avalanchas, o bien del orden de 0,2 a 0,3 m de nieve fresca sobre un manto de nieve preexistente (Manual de Carretera, MOP 2013).

Las zonas de inicio de avalanchas de nieve en Chile son habitualmente en las cimas de los cordones montañosos de la Cordillera de los Andes, donde la temperatura de manto de nieve se encuentra normalmente bajo 0°C, excepto durante las primeras nevadas de otoño y tras la temperización del manto de nieve en primavera o verano. En estas condiciones a la nieve que se deposita en un temporal se le puede asignar una densidad inicial de 0,1 gr/cm³, la cual exhibe normalmente un rápido incremento en los primeros cuatro a cinco días (McClung & Schaerer, 1993, Manual de Carreteras, MOP 2013).

TT.2.2.4.3.3 Aspecto de la ladera respecto de la dirección del viento

Las acumulaciones de nieve son afectadas por la erosión, transporte y depositación eólica, lo cual tiene el efecto de reducir los espesores de nieve en las laderas expuestas al viento e incrementarlas en las laderas a sotavento, esto se puede observar por una rápida acumulación de nieve durante una tormenta en estas últimas o durante períodos de viento, mientras que en las laderas expuestas al viento tienden a acumular menos nieve, y como resultado de esto se genera un manto más somero y compacto por la acción del viento (Daffern, 1992). Este efecto puede llegar a duplicar los montos de depositación nival en áreas protegidas del viento, o bien, en laderas expuestas al viento, reducirlos a prácticamente la mitad de la acumulación normal. Esto también genera la ocurrencia de cornisas en las laderas de sotavento las cuales se pueden quebrar y gatillar una avalancha en zonas más bajas. Es importante recordar que el aspecto de sotavento o barlovento de una ladera puede variar en un valle dependiendo de las corrientes de viento de circulación local (Daffern, 1992, Manual de Carretera, MOP 2013).

TT.2.2.4.3.4 Orientación de la ladera respecto del Sol

Las pendientes con exposición al Norte, debido a que reciben mayor radiación solar, los procesos de estabilización y asentamiento del manto de nieve son más rápidos, además el derretimiento de la nieve caída es mayor. Por lo general en estas laderas las avalanchas de nieve se generan durante y poco tiempo después de ocurrir una tormenta. En los meses de comienzo de primavera y en períodos calurosos se pueden generar avalanchas de nieve húmeda. Mientras que las laderas con exposición sur, reciben menos radiación solar, por lo cual las velocidades de estabilización del manto de nieve son lentas y los períodos de generar avalanchas después de una tormenta son mayores. En estas laderas la nieve se mantiene por períodos más largos, y se pueden generar avalanchas de placa (Daffern, 1992, Manual de Carretera, MOP 2013)

TT.2.2.4.3.5 Observación de Actividad de Avalanchas Actuales y en el Pasado

Observación de Pendientes con Aspecto Similar. Debido a que la carga de nieve en las pendientes es muy sensible a la dirección del viento, las avalanchas tienden a producirse en las pendientes cuyos aspectos son similares. Por ejemplo, si tras una tormenta se observa que la actividad de avalanchas fue más intensa en las pendientes de aspecto Sudoeste, debe inferirse que esas son las pendientes en que las avalanchas ocurrirán con mayor probabilidad en similares condiciones de viento. También debe sospecharse que en pendientes de aspecto similar, pero en las que no se produjeron avalanchas

durante el temporal, pueden subsistir condiciones de inestabilidad en el manto de nieve (Manual de Carretera, MOP 2013).

Observación de Pendientes en Cotas Similares. Es común que en condiciones específicas de viento y temperatura condicionen el inicio de las avalanchas a determinadas cotas en las pendientes de una cierta localidad, aunque en general las avalanchas se inicien en un amplio rango altitudinal. Por ejemplo, las avalanchas no se inician en las cotas más altas, sino en cotas inferiores. De ser así, debe inferirse que, en condiciones meteorológicas similares, las avalanchas se iniciarán también en esas cotas inferiores (Manual de Carretera, MOP 2013).

Frecuencia de Actividad en las Sendas de Avalanchas. Basados en datos históricos, las sendas de avalanchas pueden clasificarse con diversos grados de frecuencia de avalanchas. Según esto, si el manto de nieve en las sendas con mayor frecuencia de actividad se evalúa como estable, puede suponerse que es aún más estable en las sendas de actividad menos frecuente. Por ejemplo, si el manto se evalúa como inestable en sendas de avalanchas de ocurrencia poco frecuente, debiera ser aún más inestable en las sendas en que las avalanchas ocurren con mayor frecuencia (Manual de Carretera, MOP 2013).

Repetición de Avalanchas. La estadística indica que una vez que se ha observado actividad en una cierta senda de avalancha, es posible que vuelvan a producirse avalanchas en la misma senda durante el resto de la temporada de nieve. Esto es así en sendas con grandes zonas de inicio, donde suele ocurrir que se desliza en una avalancha la nieve de solo una parte de la zona de inicio, pero subsisten en la misma senda otros sectores con el manto de nieve sin deslizar pero en condiciones poco estables o inestables. Es común también que durante temporales con precipitaciones intensas o de larga duración, diversas avalanchas se produzcan en la misma senda durante el mismo temporal, por acumulación de nieve que vuelve repetidamente a alcanzar el espesor crítico para deslizar (Manual de Carretera, MOP 2013).

Como se ha visto las condiciones por las cuales se genera una avalancha de nieve es el resultado de la interacción de varios factores diferentes (por ejemplo: pendiente, precipitación nival, viento, temperatura, radiación solar, etc.). Como resumen de los diferentes factores que posibilitan la generación de avalanchas se presenta el CUADRO TT-2, donde se mencionan las condiciones de estos factores y los efectos en la actividad de avalanchas.

CUADRO TT-2 Esquema de clasificación y descripción genética de avalanchas

CONDICIONES		EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DE AVALANCHAS
A1. CONDICIONES FIJAS DEL TERRENO.		
1.1. Alturas relativas.	Zona de crestas y planicies.	Fuerte influencia del viento, cornisas, localmente avalanchas de placas de nieve.
	Zona sobre la línea del bosque y bajo las crestas.	Amplias áreas de avalanchas de placas de nieve.
	Zona bajo la línea del bosque.	Menor influencia del viento. Menos avalanchas de placas de nieve, prevalecen las placas blandas.
1.2. Pendiente del terreno.	>35°	Es posible la formación de avalanchas de nieve suelta.
	>25°	Es posible la formación de avalanchas de placas de nieve.
	>15°	Se retarda el inicio.
	<20°	Posible ocurrencia de avalanchas de nieve saturada en pendientes de ángulos bajo.
1.3. Orientación de la pendiente.	Con respecto al sol.	En pendientes a la sombra, más posibilidades de avalanchas de placas de nieve seca. En pendientes al sol, más posibilidades de avalanchas de nieve húmeda.
	Con respecto al viento.	En pendientes a sotavento, mayor acumulación de nieve eólica, más posibilidades de formación de placas de nieve. Lo contrario en pendientes a barlovento.
1.4. Configuración del terreno.	Pendientes abiertas y uniformes.	Avalanchas no confinadas.
	Canaletas, gargantas, crestas.	Avalanchas confinadas y encauzadas.
	Cambios en la gradiente.	Fractura en el manto de nieve en terrenos convexos.
	Escalones.	Incentiva la formación de avalanchas de nieve polvo en suspensión.
1.5. Rugosidad.	Superficie suave del suelo.	Deslizamiento y reptación de la nieve sobre suelo húmedo; se favorecen las avalanchas de fondo.
	Obstáculos que sobresalen	Avalanchas de nieve de superficie, sobre el nivel de los obstáculos.
	Vegetación.	Matorrales no totalmente cubiertos por nieve reducen la formación de avalanchas. Bosques densos evitan la formación de avalanchas.
82. CONDICIONES GENÉTICAS-CLIMA RECIENTE (Aproximadamente últimos 5 días).		
2.1. Precipitación nival.	Tipo de nieve.	Nieve suelta: avalanchas de nieve suelta. Nieve cohesiva: avalanchas de placas de nieve.
	Profundidad del incremento diario de la nieve fresca.	Se incrementa la inestabilidad con el espesor de la nieve. Fracturas en nieve nueva o vieja.
	Intensidad de la precipitación.	Se incrementa la inestabilidad con la mayor intensidad, promoviendo la fractura en nieve fresca e incrementando el riesgo en pendientes menores.
2.2. Lluvia.		Promueve la formación de avalanchas de nieve húmeda suelta, o de placas de nieve blanda. Se mezclan avalanchas y deslizamientos de tierra.
2.3. Viento.	Dirección.	Incrementa la formación de avalanchas a sotavento, en especial de placas de nieve. Formación de cornisas.
	Velocidad y duración.	Se incrementa localmente la formación de avalanchas de placas de nieve, con la mayor velocidad y duración.

2.4. Condiciones térmicas.	Temperatura y contenido de agua libre de la nieve.	Efecto en los esfuerzos y resistencia mecánica. Incremento de la temperatura origina primero crisis y luego estabilidad. Incremento de agua libre contribuye a la formación de avalanchas.
	Temperatura del aire.	Efectos similares en pendiente de cualquier aspecto.
	Radiación solar.	Efecto dominante en pendientes de cara al sol.
	Radiación térmica.	Enfriamiento de la superficie de nieve durante la noche y a la sombra; importante en clima sin nubes. Promueve la formación de escarcha superficial y profunda.
83. CONDICIONES GENÉTICAS-DE NIEVE VIEJA.		
3.1. Espesor total del manto de nieve.		Influye en la masa de las avalanchas de fondo. Importante en la compactación y metamorfismo del manto de nieve.
3.2. Estratificación.	Secuencia de estratos de resistencia variable.	La estabilidad está definida por el estrato más débil, con respecto a la situación de esfuerzos en el manto de nieve.
	Estrato más superficial.	La falta de cohesión, la fragilidad y la rugosidad, son importantes para la estabilidad de la nueva precipitación nival.
	Interior del manto de nieve.	Fracturas en nieve vieja son causadas por estratos débiles al interior del manto, en particular por estratos de escarcha profunda.
84. CONDICIONES GENÉTICAS-MECANISMOS QUE GATILLAN AVALANCHAS.		
4.1. Mecanismos naturales de inicio.	Influencias internas.	Relativas al manto de nieve.
	Influencias externas	Relativas al clima y al relieve
4.2. Inicio causado por personas.	Gatillo accidental	Avalanchas por accidentes.
	Gatillo intencional	Avalanchas artificiales.

Fuente: Manual de Carreteras (MOP, 2013)

TT.3 Referencias

- Antinao, J., Fernández, J., Naranjo, J. & Villarroel, P., 2002. Peligro de Remociones en Masa e Inundaciones en la Cuenca de Santiago, Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile. Serie Geología Ambiental, No. 2, 1 mapa escala 1:100.000.
- Centeno, J., Fraile, M., Otero, M. & Pividal, A., 1994. Geomorfología Práctica. Ejercicios de fotointerpretación y planificación geoambiental.. Madrid: Ed. Rueda.
- Costa, J., 1984. Physical geomorphology of debris flows. In Developments and Applications of Geomorphology. En: J. E. Costa & P. J. Fleisher, edits. Developments and Applications of Geomorphology. Berlin: Springer-Verlag, pp. 268-317.
- Cruden, D. & Varnes, D., 1996. Landslide types and processes, Washington D.C.: Special Report 247: Landslides: Investigation and Mitigation, Transportation Research Board.
- Daffern, T., 1992. *Avalanche Safety*. The Mountaineers. 192 p.
- DeMets, C., Gordon, R., Argus, D. & Stein, S., 1994. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophysical Research Letters*, 21(20), pp. 2191-2194.
- Díez-Herrero, A., Laín-Huerta, L. & Llorente-Isidro, M., 2008. Mapas de Peligrosidad por avenidas e inundaciones: Guía metodológica para su elaboración. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España. Serie Riesgos Geológicos/Geotecnia No. 1, 190 pág.

- González-Ferrán, O., 1995. Volcanes de Chile. Santiago: Instituto Geográfico Militar, 410 pág.
- Hauser, A., 1985. Flujos aluvionales de 1870 y 1896 ocurridos en la ladera norte del volcán Yates, X Región: su implicancia en la evaluación de riesgos naturales. Revista Geológica de Chile, Volumen 25-26, pp. 125-133.
- Hauser, A., 1997. Los aluviones del 18 de Junio de 1991 en Antofagasta: un análisis crítico, a 5 años del desastre, Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín N° 49, 47 pág.
- Hauser, A., 2000. Remociones en masa en Chile. 2da ed. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín N° 59, versión actualizada, 89 pág.
- Iida, K., 1963. A relation of earthquake energy to tsunami energy and the estimation of the vertical displacement in a tsunami source. Journal of Earth Science, 2(1), pp. 49-67.
- Inamura, A., 1942. History of Japanese Tsunamis. Kayo-No-Kagaku, Volumen 2, pp. 74-80.
- Inamura, A., 1949. List of Tsunamis in Japan. Journal of Seismological Society of Japan, Volumen 2, pp. 23-28.
- Keeper, D., 1984. Landslides caused by earthquakes. Geological Society of América Bulletin, 95(4), pp. 406-421.
- Keller, E. & Blodgett, R., 2004. Riesgos Naturales. Madrid: Pearson Education S.A., 448 pág.
- Martin, G. & Lew, M., 1999. Recommended Procedures for Implementation of DMG Special Publication 117: Guidelines for Analyzing and Mitigating Liquefaction Hazards in California. Los Angeles: Southern California Earthquake Center, University of Southern California, 63 pág.
- McClung, D., & Shaerer, P., 1993. *The avalanche handbook*. The Mountaineers. 271 p.
- Mears, A., 1979. *Colorado Snow-Avalanche Area Studies and Guidelines for Avalanche-Hazard Planning*. Denver: Colorado Geological Survey. Dept. of Natural Resources. Special Publication 7. 125 pág.
- Mears, A., 1992. *Snow-Avalanche Hazard Analysis for Land-Use Planning and Engineering*. Denver, Colorado: Boletín 49. Colorado Geological Survey, Department of Natural Resources. 55 pág.
- MOP. (2013). Capítulo 3.900 Riesgo y Protección de Avalanchas de Nieve. En *Manual de Carreteras Volumen N° 3, Instrucciones y Criterios de Diseño*. (pág. 1465). Santiago: Dirección de Vialidad, Dirección General de Obras Públicas, Ministerio de Obras Públicas, Chile.
- Myers, B. & Brantley, S., 1995. Hazardous phenomena at volcanoes, Vancouver, Washington.: USGS Open File Report, pág. 95-231.
- Naranjo, J. A., 1987. Interpretación de la actividad cenozoica superior a lo largo de la Zona de Falla de Atacama, norte de Chile. Revista Geológica de Chile, Issue 31, pp. 43-55.
- Naranjo, J. & Varela, J., 1996. Debris and mud flows that affected the eastern area of Santiago on May 3, 1993, Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería. Boletín No. 47, 42 pág.
- Natural Resources Canada, 2011. Natural Resources Canada. [En línea]
Available at: <http://atlas.nrcan.gc.ca/auth/english/maps/environment/naturalhazards/tsunami/1>
[Último acceso: 25 11 2011].

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

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

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

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

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

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

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

Sruoga, P., 2002. El volcanismo reciente y riesgo asociado en la Provincia de Mendoza, Mendoza: IANIGLA, 30 Años de Investigación Básica y Aplicada en Ciencias Ambientales, pág. 255-259.

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

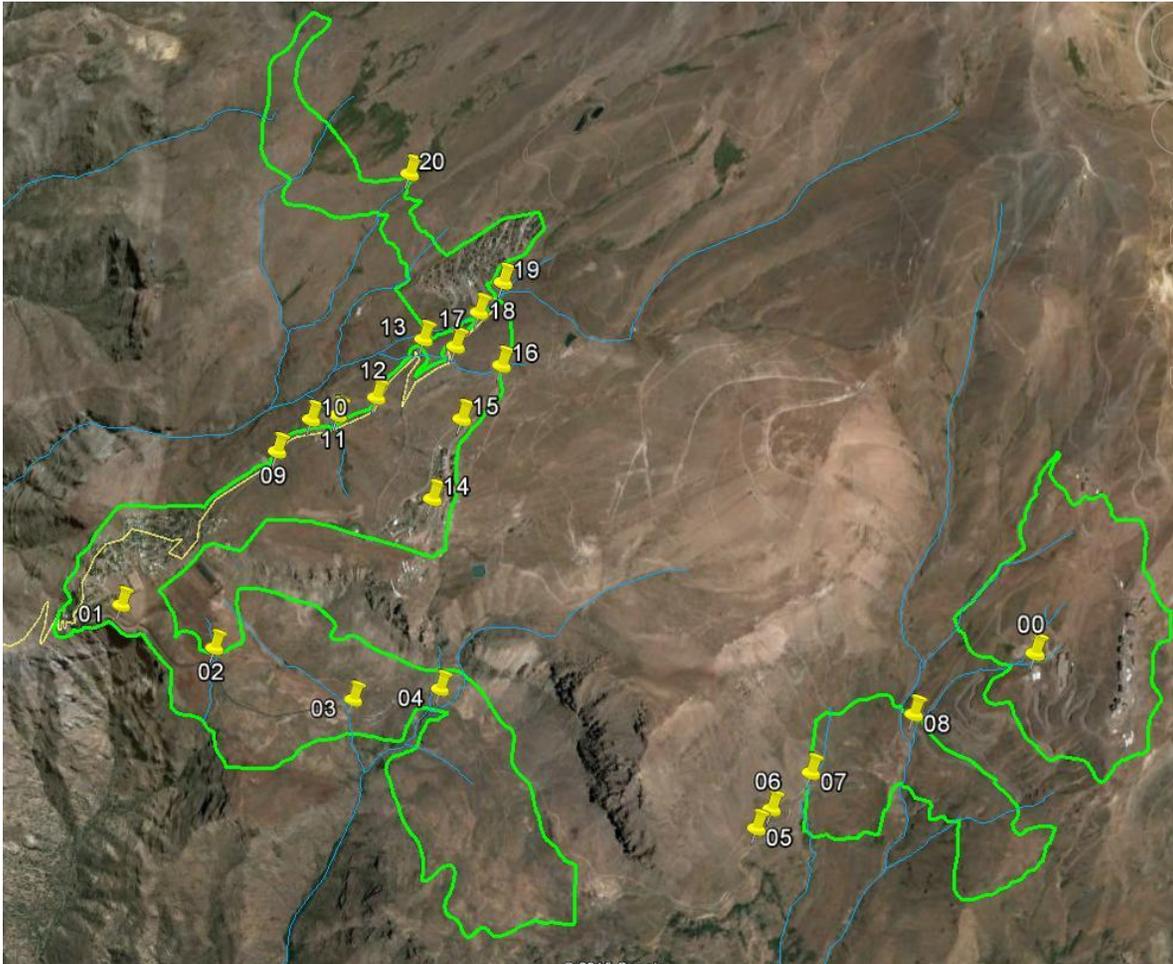
Watt, S., Pyle, D., Naranjo, J. & Mather, T., 2009. Landslide and tsunami hazard at Yate volcano, Chile as an example of edifice destruction on strike-slip fault zones. *Bulletin of Volcanology*, 71(5), pp. 559-574.

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

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

ANEXO UU Detalle de las actividades realizadas en terreno

En la siguiente figura, se muestra el recorrido del terreno con enfoque hidrológico-hidráulico realizado el día 5 de noviembre de 2015, y en el CUADRO UU-1 se presentan las actividades realizadas en cada punto.



CUADRO UU-1 Puntos visitados en terreno 05-11-2015

N°	DESCRIPCIÓN
00	Vista general valle nevado
01	Camino a valle nevado. Existe cruce de alcantarilla. Aguas arriba del cruce se presenta un sector plano. El lecho está compuesto de suelo fino.
02	Km 1 a Valle Nevado. Existencia de alcantarilla. Km 1,3 a V. N. Cuenca aportante mayor. Cruce de alcantarilla en camino
03	Quebrada con baja pendiente y gran cuenca aportante. Lecho con vegetación.
04	Quebrada Las Masas. Km 2,7. Pendiente pronunciada, dos cruces de alcantarilla, lecho con rocas 30-40 cm de diámetro.
05	Quebrada fuera del área de estudio, cruce de alcantarilla.
06	Afloramiento de vertiente
07	Desagüe derretimiento con cruce de cañería. Aguas arriba lecho rocas, aguas abajo lecho con sedimento más fino
08	Quebrada Honda. Dos cruces de quebrada. Lecho rocoso.
09	Quebrada con poca pendiente aguas arriba del camino, lecho con suelo - vegetación
10	Quebrada con poca pendiente aguas arriba del camino, lecho con suelo – vegetación
11	Quebrada afluyente a Estero Manzanito o Barros Negros. Quebrada con baja pendiente con aguas que afloran aguas arriba del cruce del camino
12	Quebrada de cruce. Lecho con grande rocas aguas arriba y aguas abajo del camino, poca pendiente.
13	Quebrada con agua de hielo escurriendo. Lecho con piedras de mediano tamaño. Afluyente a Estero Manzanito o Barros Negros
14	Vista general Colorado
15	Vista hacia Estero Manzanito o Barros Negros
16	Quebrada afluyente a Estero Manzanito o Barros Negros. Lecho rocoso.
17	Quebrada afluyente a Estero Manzanito o Barros Negros.
18	Quebrada camino hacia La Parva. Lecho con piedras tamaño mediano
19	Esteros El Manzanito o Barros Negros. Lecho fondo rocoso

ANEXO VV Sitios de interés geológico

CUADRO VV-1 Sitios de interés geológico identificados en el área de análisis de este estudio.

N° Ficha		1	2	3	4
Nombre del Sitio		Mirador Farellones	Laguna Farellones	Depósitos Glaciales en la Quebrada Honda	Mirador Valle Nevado
Ubicación	<i>Este</i>	377373,09	378812,91	382588,22	383830
	<i>Norte</i>	6308483,48	6308543,94	6308066,9	6308294
Clasificación del Sitio según su tipo de valor (Brilha, 2015)	<i>Geositio</i>				
	<i>Sitio de Geodiversidad</i>	X	X	X	X
Tipo de Sitio según escala (Pereira et al., 2007)	<i>Sitio aislado</i>			X	
	<i>Área</i>		X		
	<i>Vista Panorámica</i>	X			X
Áreas específicas de interés	<i>Geomorfología</i>	X	X	X	X
	<i>Geología Estructural</i>	X			X
	<i>Paleontología</i>				
	<i>Mineralogía/Petrología</i>				
	<i>Sedimentología</i>			X	
	<i>Geología Regional</i>	X			X
	<i>Otros (especificar)</i>	Estratigrafía	Peligros Geológicos	Paleoclima, glaciología	Estratigrafía

ESTUDIO DE RIESGO Y PROTECCIÓN AMBIENTAL - SECTOR CENTRO CORDILLERA, COMUNA DE LO BARNECHEA

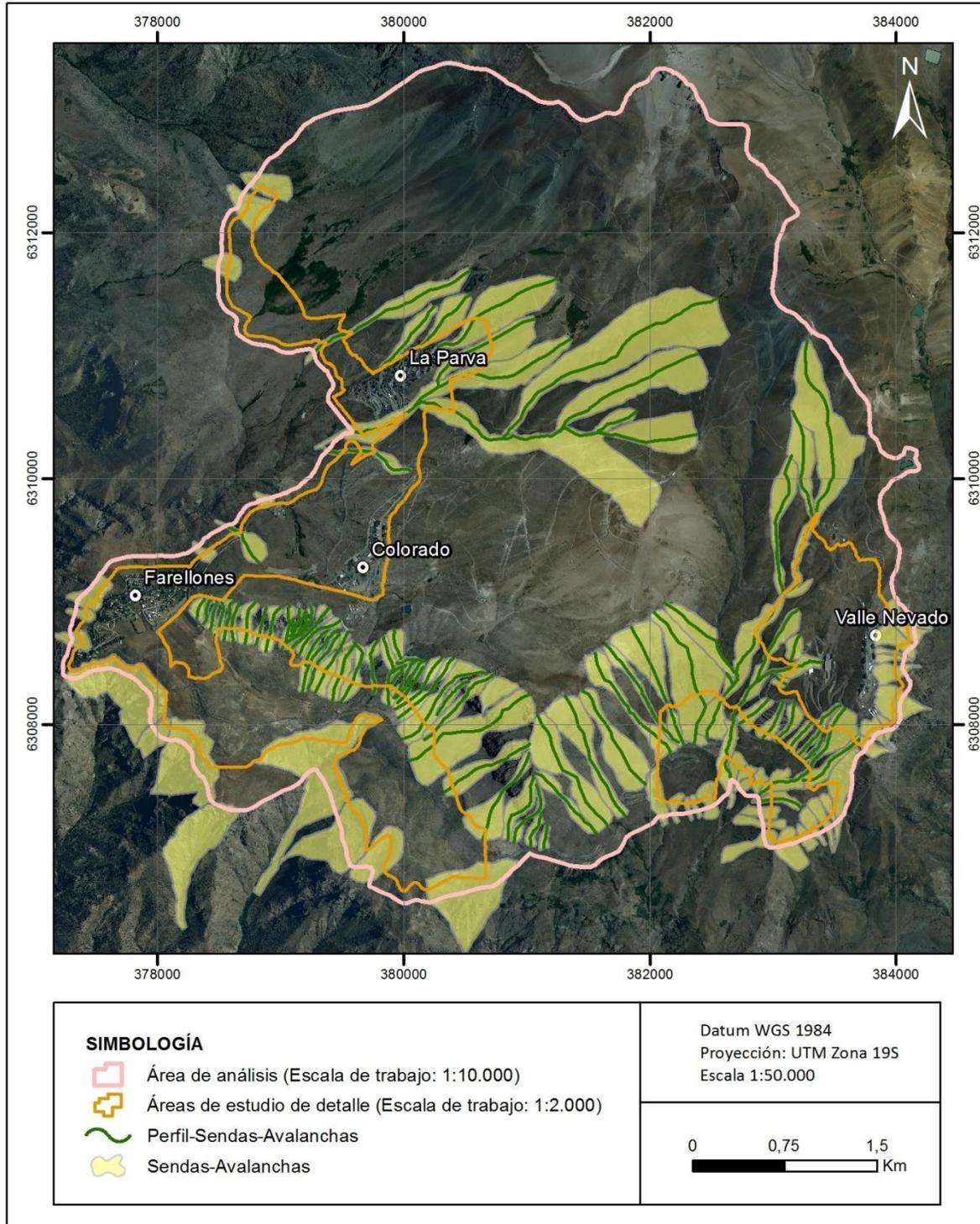
N° Ficha	1	2	3	4
Nombre del Sitio	Mirador Farellones	Laguna Farellones	Depósitos Glaciales en la Quebrada Honda	Mirador Valle Nevado
Valoración Cualitativa y Recomendaciones	<p><u>Valor didáctico y pedagógico.</u> Se observan rasgos morfológicos y estructurales y la geología que caracteriza el sector cordillerano de la Región Metropolitana.</p> <p><u>Valor escénico.</u> Se observa la configuración del relieve actual dada por la erosión y fuerte incisión del Río Molina, descubriendo potentes rocas volcanosedimentarias.</p>	<p><u>Valor didáctico y pedagógico.</u> Se observan una serie de rasgos que permiten reconocer y explicar diferentes tipos de remociones en masa y sus consecuencias.</p> <p><u>Valor escénico.</u> Dado por la presencia de grandes farellones rocosos hacia el norte, la pequeña laguna, grandes bloques rocosos y vegetación nativa.</p>	<p><u>Valor pedagógico.</u> Observación de depósitos glaciares asociados a la Última Glaciación</p>	<p><u>Valor didáctico y pedagógico.</u> Se observa la secuencia volcanosedimentarias de la Formación Farellones, presentando acuíferos y formas que se podrían asociar a flujos volcánicos.</p> <p><u>Valor escénico.</u> Se observa la configuración del relieve actual dada por la erosión y fuerte incisión del Río Molina, descubriendo potentes rocas volcanosedimentarias.</p>
Publicaciones relacionadas	Rauld, R. 2011. Deformación cortical y peligro sísmico asociado a la falla San Ramón en el frente cordillerano de Santiago, Chile central (33°S), RM. Tesis de doctorado, Depto. de Geología, Universidad de Chile. 311p.	No existen publicaciones científicas que abarquen esta área de manera específica.	Araya-Vergara, J. 2008. Geomorfología glacial y paraglacial de la cuenca andina del Mapocho, Andes de Santiago, Chile. Investigaciones Geográficas Universidad de Chile, vol. 40	Rodríguez, C. 2013. Patrimonio geológico en la ciudad de Santiago: caracterización y valoración de geosítios en torno a un núcleo urbano. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile. Santiago. 156 p.
Fotografías	Figura N° 4-2	Figura N° 4-3 y Figura N° 4-4	Figura N° 4-5 y Figura N° 4-6	Figura N° 4-7

Fuente: Elaboración propia, basada en Brilha (2015) y Pereira et al. (2007).

ANEXO WW Sendas de avalancha identificadas

WW.1 Ubicación de las sendas de avalanchas

FIGURA WW-1 Sendas de avalanchas y perfiles



Fuente: Elaboración propia

WW.2 Descripción de sendas de avalanchas

CUADRO WW-1 Resumen de Sendas de Avalanchas "Estudio de riesgo y protección ambiental sector Centro Cordillera, comuna de Lo Barnechea"

ID Avalancha	Área senda de Avalancha M2	Longitud Eje Perfil (m) Senda de Avalancha	N° Zonas de Inicio Senda de Avalancha	N° Trayectorias Senda de Avalancha	% Área de Generación Senda de Avalancha	% Área de Recorrido (Generación + Recorrido) Senda de Avalancha	% Área de Depósito Senda de Avalancha	% Área de Achantilado Senda de Avalancha	Orientación de Senda de Avalancha		Tipo zona inicio - recorrido - depósito Senda de Avalancha	Tipo de Ladera	Valor Suceptibilidad	Suceptibilidad	Volumen de nieve de avalancha de nieve (considerando 1 m de nieve en manto)
ID_1	140815	1441	1	1	53%	88,2%	11,4 %	0,5%	Sur	Noroeste	Confinada principalmente	Convexa-cóncava	74905	Alto	124161
ID_2	53950	684	1	1	18%	82,2%	17,8 %	0,0%	Sur	Suroeste	Semi confinada	Cóncava-recta	9757	Bajo	44368
ID_3	78618	601	1	1	19%	94,6%	5,4 %	0,0%	Suroeste	Sur	Abierta-Confinada	Recta	14558	Moderado	74340
ID_4	239191	1143	1	1	15%	97,8%	2,2 %	0,0%	Oeste	Suroeste	Abierta-Confinada	Cóncava-recta	35007	Moderado	233836
ID_5	160273	1010	1	2	19%	93,0%	7,0 %	0,0%	Oeste	Suroeste	Abierta-Confinada	Recta-cóncava	31004	Moderado	149062
ID_6	313247	2006	1	1	53%	91,9%	6,3 %	1,8%	Noroeste	Sur	Abierta-Confinada	Recta	162619	Muy Alto	287854
ID_7	608688	2164	1	1	32%	88,6%	11,4 %	0,0%	Sur	Noroeste	Abierta-Confinada	Convexa	193835	Muy Alto	539354
ID_8	306737	1308	2	1	24%	96,6%	3,4 %	0,0%	Oeste	Sur	Abierta-Confinada	Cóncava	74790	Alto	296182
ID_9	35464	372	1	1	33%	97,5%	2,5 %	0,0%	Suroeste	Oeste	Abierta	Convexa-recta	11863	Moderado	34592
ID_10	649139	2476	2	2	27%	94,9%	5,1 %	0,0%	Norte	Noroeste	Abierta-Confinada	Cóncava-recta	173932	Muy Alto	616339
ID_11	39938	737	1	1	33%	81,8%	17,3 %	0,9%	Oeste	Suroeste	Confinada principalmente	Convexa	13254	Moderado	32681

ESTUDIO DE RIESGO Y PROTECCIÓN AMBIENTAL - SECTOR CENTRO CORDILLERA, COMUNA DE LO BARNECHEA

ID Avalancha	Área senda de Avalancha M2	Longitud Eje Perfil (m) Senda de Avalancha	N° Zonas de Inicio Senda de Avalancha	N° Trayectorias Senda de Avalancha	% Área de Generación Senda de Avalancha	% Área de Recorrido (Generación + Recorrido) Senda de Avalancha	% Área de Depósito Senda de Avalancha	% Área de Acanalado Senda de Avalancha	Orientación de Senda de Avalancha		Tipo zona inicio - recorrido - depósito Senda de Avalancha	Tipo de Ladera	Valor Suceptibilidad	Suceptibilidad	Volumen de nieve de avalancha de nieve (considerando 1 m de nieve en manto)
ID_12	46039	408	2	1	17%	89,8%	9,2 %	1,0%	Noroeste	Oeste	Abierta- Confinada	Convexa	7705	Bajo	41360
ID_13	16401	183	1	1	30%	74,6%	25,2 %	0,2%	Sur	Suroeste	Abierta	Cóncava	4887	Bajo	12237
ID_14	7221	224	1	1	52%	63,6%	16,8 %	19,6%	Suroeste	Sur	Abierta- Confinada	Recta	3033	Bajo	4591
ID_15	10738	250	1	1	25%	40,4%	20,7 %	39,0%	Sur	Suroeste	Abierta- Confinada- Abierta	Convexa	1615	Bajo	4335
ID_16	11731	289	1	1	32%	44,7%	27,6 %	27,6%	Sur	Suroeste	Abierta- Confinada- Abierta	Convexa	2732	Bajo	5245
ID_17	12845	351	1	1	35%	58,2%	41,8 %	0,0%	Sur	Sureste	Abierta- Confinada- Abierta	Recta- cóncava	4543	Bajo	7470
ID_18	16640	304	1	1	53%	63,8%	26,3 %	9,9%	Suroeste	Sur	Abierta- Confinada- Abierta	Recta- cóncava	7954	Bajo	10621
ID_19	36282	358	1	1	43%	65,4%	24,1 %	10,5%	Sur	Suroeste	Abierta	Convexa- cóncava	14027	Moderado	23738
ID_20	12077	302	1	1	35%	65,7%	21,4 %	12,9%	Sur	Suroeste	Abierta- Confinada- Abierta	Convexa- cóncava	3718	Bajo	7934
ID_21	28503	385	1	1	38%	62,8%	21,3 %	15,9%	Sur	Suroeste	Abierta- Confinada- Abierta	Convexa- cóncava	8996	Bajo	17911

ESTUDIO DE RIESGO Y PROTECCIÓN AMBIENTAL - SECTOR CENTRO CORDILLERA, COMUNA DE LO BARNECHEA

ID Avalancha	Área senda de Avalancha M2	Longitud Eje Perfil (m) Senda de Avalancha	N° Zonas de Inicio Senda de Avalancha	N° Trayectorias Senda de Avalancha	% Área de Generación Senda de Avalancha	% Área de Recorrido (Generación + Recorrido) Senda de Avalancha	% Área de Depósito Senda de Avalancha	% Área de Acanalado Senda de Avalancha	Orientación de Senda de Avalancha		Tipo zona inicio - recorrido - depósito Senda de Avalancha	Tipo de Ladera	Valor Suceptibilidad	Suceptibilidad	Volumen de nieve de avalancha de nieve (considerando 1 m de nieve en manto)
ID_22	19768	366	1	1	38%	61,9%	14,7 %	23,5%	Suroeste	Sur	Abierta- Confinada- Abierta	Convexa- cóncava	5790	Bajo	12228
ID_23	2049	103	1	1	32%	32,4%	0,0 %	67,6%	Sur		Abierta- Confinada- Abierta	Cóncava	214	Bajo	663
ID_24	6074	248	1	1	71%	78,6%	0,0 %	21,4%	Sur	Suroeste	Abierta- Confinada- Abierta	Convexa- cóncava	3388	Bajo	4776
ID_25	5137	228	1	1	59%	67,8%	0,0 %	32,2%	Suroeste	Sur	Abierta- Confinada- Abierta	Convexa- cóncava	2054	Bajo	3481
ID_26	3259	208	1	1	28%	41,1%	0,0 %	58,9%	Sur	Suroeste	Abierta- Confinada- Abierta	Cóncava	380	Bajo	1338
ID_27	8775	393	1	1	57%	90,8%	0,4 %	8,8%	Suroeste	Sur	Abierta- Confinada- Abierta	Convexa- cóncava	4523	Bajo	7969
ID_28	17777	487	2	1	56%	96,9%	0,6 %	2,6%	Suroeste	Sur	Abierta- Confinada- Abierta	Convexa- cóncava	9760	Bajo	17219
ID_29	30131	463	2	1	58%	86,7%	4,3 %	9,0%	Suroeste	Sur	Abierta- Confinada- Abierta	Recta- cóncava	15919	Moderado	26112
ID_30	16064	343	1	1	37%	72,7%	12,6 %	14,7%	Suroeste	Sur	Abierta	Cóncava	5081	Bajo	11681

ESTUDIO DE RIESGO Y PROTECCIÓN AMBIENTAL - SECTOR CENTRO CORDILLERA, COMUNA DE LO BARNECHEA

ID Avalancha	Área senda de Avalancha M2	Longitud Eje Perfil (m) Senda de Avalancha	N° Zonas de Inicio Senda de Avalancha	N° Trayectorias Senda de Avalancha	% Área de Generación Senda de Avalancha	% Área de Recorrido (Generación + Recorrido) Senda de Avalancha	% Área de Depósito Senda de Avalancha	% Área de Acanalado Senda de Avalancha	Orientación de Senda de Avalancha		Tipo zona inicio - recorrido - depósito Senda de Avalancha	Tipo de Ladera	Valor Suceptibilidad	Suceptibilidad	Volumen de nieve de avalancha de nieve (considerando 1 m de nieve en manto)
ID_31	34262	585	1	1	27%	72,0%	20,1 %	8,0%	Sur	Suroeste	Abierta-Confinada-Abierta	Cóncava	8551	Bajo	24654
ID_32	23187	518	1	1	38%	74,1%	3,3 %	22,6%	Suroeste	Sur	Abierta-Confinada-Abierta	Cóncava	6731	Bajo	17187
ID_33	56392	562	2	1	51%	81,8%	6,0 %	12,2%	Suroeste	Sur	Abierta-Confinada-Abierta	Cóncava	25477	Moderado	46134
ID_34	47169	489	1	1	52%	74,0%	6,2 %	19,8%	Sur	Suroeste	Abierta	Cóncava	19690	Moderado	34914
ID_35	41952	538	2	1	49%	74,3%	8,3 %	17,4%	Sur	Suroeste	Abierta-Confinada-Abierta	Recta-cóncava	16959	Moderado	31189
ID_36	21069	462	2	1	51%	67,5%	0,8 %	31,7%	Suroeste	Sur	Confinada principalmente	Cóncava	7404	Bajo	14222
ID_37	38778	581	1	1	57%	66,3%	31,0 %	2,6%	Sur	Sureste	Abierta-Confinada	Cóncava	21542	Moderado	25727
ID_38	26084	248	1	1	93%	93,9%	0,0 %	6,1%	Sur	Sureste	Abierta	Convexa	22679	Moderado	24485
ID_39	7799	189	1	1	69%	73,5%	0,3 %	26,1%	Oeste	Noroeste	Abierta	Convexa	3953	Bajo	5734
ID_40	6134	137	1	1	74%	73,9%	0,0 %	26,1%	Oeste	Suroeste	Abierta	Convexa-cóncava	3353	Bajo	4535
ID_41	3663	157	1	1	74%	81,3%	0,0 %	18,8%	Suroeste	Sur	Abierta	Recta	2211	Bajo	2976

ESTUDIO DE RIESGO Y PROTECCIÓN AMBIENTAL - SECTOR CENTRO CORDILLERA, COMUNA DE LO BARNECHEA

ID Avalancha	Área senda de Avalancha M2	Longitud Eje Perfil (m) Senda de Avalancha	N° Zonas de Inicio Senda de Avalancha	N° Trayectorias Senda de Avalancha	% Área de Generación Senda de Avalancha	% Área de Recorrido (Generación + Recorrido) Senda de Avalancha	% Área de Depósito Senda de Avalancha	% Área de Acantilado Senda de Avalancha	Orientación de Senda de Avalancha		Tipo zona inicio - recorrido - depósito Senda de Avalancha	Tipo de Ladera	Valor Suceptibilidad	Suceptibilidad	Volumen de nieve de avalancha de nieve (considerando 1 m de nieve en manto)
ID_42	15311	360	1	1	86%	96,3%	3,7 %	0,0%	Suroeste	Sur	Abierta- Confinada- Abierta	Convexa- cóncava	13220	Moderado	14746
ID_43	12217	389	1	1	94%	100,0%	0,0 %	0,0%	Suroeste	Sur	Abierta- Confinada- Abierta	Convexa- recta	11543	Moderado	12217
ID_44	9789	355	1	1	58%	89,8%	9,1 %	1,1%	Suroeste	Sur	Abierta- Confinada- Abierta	Convexa- cóncava	5623	Bajo	8789
ID_45	47741	583	1	1	59%	92,5%	7,2 %	0,3%	Suroeste	Sur	Abierta- Confinada- Abierta	Recta- cóncava	28080	Moderado	44154
ID_46	48222	670	1	1	65%	94,5%	5,5 %	0,0%	Suroeste	Sur	Abierta- Confinada- Abierta	Recta- cóncava	31277	Moderado	45575
ID_47	118987	942	2	1	46%	63,4%	33,0 %	3,5%	Suroeste	Oeste	Abierta- Confinada- Abierta	Recta- cóncava	52447	Alto	75494
ID_48	20440	390	1	1	83%	82,9%	0,0 %	17,1%	Suroeste	Oeste	Abierta	Cóncava- recta	14062	Moderado	16954
ID_49	66384	789	1	1	55%	71,0%	10,0 %	19,0%	Suroeste	Oeste	Abierta	Convexa- cóncava	29441	Moderado	47138
ID_50	348608	1168	2	1	50%	69,6%	22,9 %	7,5%	Suroeste	Oeste	Abierta- Confinada- Abierta	Convexa- cóncava	16175 1	Muy Alto	242786

ESTUDIO DE RIESGO Y PROTECCIÓN AMBIENTAL - SECTOR CENTRO CORDILLERA, COMUNA DE LO BARNECHEA

ID Avalancha	Área senda de Avalancha M2	Longitud Eje Perfil (m) Senda de Avalancha	N° Zonas de Inicio Senda de Avalancha	N° Trayectorias Senda de Avalancha	% Área de Generación Senda de Avalancha	% Área de Recorrido (Generación + Recorrido) Senda de Avalancha	% Área de Depósito Senda de Avalancha	% Área de Acanalado Senda de Avalancha	Orientación de Senda de Avalancha		Tipo zona inicio - recorrido - depósito Senda de Avalancha	Tipo de Ladera	Valor Suceptibilidad	Suceptibilidad	Volumen de nieve de avalancha de nieve (considerando 1 m de nieve en manto)
ID_51	97169	805	1	1	42%	71,1%	12,9 %	16,1%	Oeste	Suroeste	Abierta-Confinada-Abierta	Cóncava	34324	Moderado	69043
ID_52	107957	815	1	1	34%	80,3%	17,1 %	2,6%	Suroeste	Sur	Abierta-Confinada-Abierta	Recta-cóncava	35978	Moderado	86716
ID_53	62645	612	1	1	46%	71,5%	6,6 %	21,9%	Suroeste	Sur	Abierta	Convexa-recta	22702	Moderado	44789
ID_54	24447	561	1	1	64%	90,5%	4,5 %	5,0%	Sur	Suroeste	Abierta-Confinada-Abierta	Convexa-cóncava	14853	Moderado	22126
ID_55	18317	289	1	1	41%	53,3%	15,0 %	31,7%	Sur	Suroeste	Abierta	Convexa-cóncava	5141	Bajo	9771
ID_56	12249	208	1	1	63%	79,0%	0,0 %	21,0%	Sur	Suroeste	Abierta	Cóncava	6140	Bajo	9674
ID_57	57116	705	1	1	55%	86,4%	11,4 %	2,1%	Sureste	Sur	Abierta-Confinada-Abierta	Recta-cóncava	30684	Moderado	49370
ID_58	199064	1097	1	1	59%	94,7%	4,8 %	0,5%	Sureste	Sur	Abierta-Confinada-Abierta	Recta-cóncava	11589 6	Muy Alto	188429
ID_59	164062	1098	1	1	68%	94,9%	4,0 %	1,1%	Sureste	Sur	Abierta-Confinada-Abierta	Convexa-cóncava	11031 3	Muy Alto	155693
ID_60	166081	925	1	1	42%	82,6%	13,9 %	3,5%	Sureste	Sur	Abierta-Confinada-Abierta	Convexa-cóncava	66523	Alto	137176

ESTUDIO DE RIESGO Y PROTECCIÓN AMBIENTAL - SECTOR CENTRO CORDILLERA, COMUNA DE LO BARNECHEA

ID Avalancha	Área senda de Avalancha M2	Longitud Eje Perfil (m) Senda de Avalancha	N° Zonas de Inicio Senda de Avalancha	N° Trayectorias Senda de Avalancha	% Área de Generación Senda de Avalancha	% Área de Recorrido (Generación + Recorrido) Senda de Avalancha	% Área de Depósito Senda de Avalancha	% Área de Acanalado Senda de Avalancha	Orientación de Senda de Avalancha		Tipo zona inicio - recorrido - depósito Senda de Avalancha	Tipo de Ladera	Valor Suceptibilidad	Suceptibilidad	Volumen de nieve de avalancha de nieve (considerando 1 m de nieve en manto)
ID_61	124914	1045	2	1	65%	77,3%	20,7 %	2,0%	Sureste	Sur	Abierta- Confinada- Abierta	Recta- cóncava	79404	Alto	96586
ID_62	59635	1003	1	1	88%	90,1%	9,9 %	0,0%	Sureste	Sur	Confinada principalmente	Recta- cóncava	52466	Alto	53750
ID_63	189243	1043	3	1	79%	84,4%	12,9 %	2,7%	Sur	Sureste	Abierta- Confinada- Abierta	Recta- cóncava	14587 1	Muy Alto	159689
ID_64	308447	1232	3	2	54%	75,2%	21,6 %	3,2%	Sur	Sureste	Abierta	Convexa- cóncava	16219 1	Muy Alto	231936
ID_65	96077	857	1	1	80%	98,7%	1,3 %	0,0%	Sureste	Este	Abierta- Confinada	Cóncava	76787	Alto	94799
ID_66	7771	110	1	1	100 %	100,0%	0,0 %	0,0%	Sureste	Sur	Abierta	Convexa	7771	Bajo	7771
ID_67	172820	1396	1	1	52%	79,5%	20,5 %	0,0%	Sureste	Sur	Abierta- Confinada- Abierta	Convexa	90630	Alto	137404
ID_68	107961	1178	1	1	11%	74,6%	25,4 %	0,0%	Sur	Sureste	Confinada principalmente	Recta	11803	Moderado	80588
ID_69	105791	893	1	1	23%	91,8%	8,2 %	0,0%	Sur	Sureste	Abierta	Recta	24224	Moderado	97123
ID_70	410927	2277	3	2	34%	89,3%	10,7 %	0,0%	Este	Suroeste	Abierta- Confinada- Abierta	Cóncava- convexa	14040 6	Muy Alto	366813

ESTUDIO DE RIESGO Y PROTECCIÓN AMBIENTAL - SECTOR CENTRO CORDILLERA, COMUNA DE LO BARNECHEA

ID Avalancha	Área senda de Avalancha M2	Longitud Eje Perfil (m) Senda de Avalancha	N° Zonas de Inicio Senda de Avalancha	N° Trayectorias Senda de Avalancha	% Área de Generación Senda de Avalancha	% Área de Recorrido (Generación + Recorrido) Senda de Avalancha	% Área de Depósito Senda de Avalancha	% Área de Acanalado Senda de Avalancha	Orientación de Senda de Avalancha		Tipo zona inicio - recorrido - depósito Senda de Avalancha	Tipo de Ladera	Valor Suceptibilidad	Suceptibilidad	Volumen de nieve de avalancha de nieve (considerando 1 m de nieve en manto)
ID_71	55460	698	2	2	23%	93,0%	7,0 %	0,0%	Oeste	Sur	Abierta- Confinada- Abierta	Convexa	12990	Moderado	51557
ID_72	23415	211	1	1	47%	72,5%	27,5 %	0,0%	Sur	Suroeste	Abierta	Cóncava	10945	Moderado	16967
ID_73	58424	945	3	2	56%	91,9%	8,1 %	0,0%	Noroeste	Oeste	Abierta- Confinada- Abierta	Convexa	32781	Moderado	53691
ID_74	64829	537	4	2	70%	80,7%	16,9 %	2,4%	Sureste	Este	Abierta- Confinada- Abierta	Convexa	44496	Moderado	52314
ID_75	33621	306	1	1	60%	85,6%	14,1 %	0,4%	Suroeste	Oeste	Abierta	Recta	20048	Moderado	28772
ID_76	28598	330	1	1	67%	89,7%	10,2 %	0,1%	Suroeste	Sur	Abierta	Convexa	19231	Moderado	25656
ID_77	27862	365	1	1	88%	97,0%	3,0 %	0,0%	Suroeste	Oeste	Abierta	Convexa	24536	Moderado	27037
ID_78	20308	309	1	1	90%	94,7%	5,3 %	0,0%	Suroeste	Sur	Abierta	Convexa	18299	Moderado	19228
ID_79	12259	287	1	1	88%	94,9%	4,1 %	1,0%	Suroeste	Oeste	Abierta	Convexa	10676	Moderado	11635
ID_80	8459	231	1	1	64%	82,4%	8,4 %	9,3%	Suroeste	Sur	Abierta	Convexa	4950	Bajo	6969
ID_81	13084	236	1	1	77%	90,7%	5,7 %	3,6%	Suroeste	Sur	Abierta	Convexa	9680	Bajo	11863

ESTUDIO DE RIESGO Y PROTECCIÓN AMBIENTAL - SECTOR CENTRO CORDILLERA, COMUNA DE LO BARNECHEA

ID Avalancha	Área senda de Avalancha M2	Longitud Eje Perfil (m) Senda de Avalancha	N° Zonas de Inicio Senda de Avalancha	N° Trayectorias Senda de Avalancha	% Área de Generación Senda de Avalancha	% Área de Recorrido (Generación + Recorrido) Senda de Avalancha	% Área de Depósito Senda de Avalancha	% Área de Acanalado Senda de Avalancha	Orientación de Senda de Avalancha		Tipo zona inicio - recorrido - depósito Senda de Avalancha	Tipo de Ladera	Valor Suceptibilidad	Suceptibilidad	Volumen de nieve de avalancha de nieve (considerando 1 m de nieve en manto)
ID_82	79422	650	3	2	87%	98,1%	0,6 %	1,3%	Suroeste	Oeste	Abierta- Confinada	Cóncava- convexa	67877	Alto	77894
ID_83	49674	592	1	1	58%	82,2%	17,8 %	0,0%	Suroeste	Oeste	Abierta	Convexa	28731	Moderado	40818
ID_84	47008	430	3	1	62%	95,4%	3,3 %	1,3%	Oeste	Sur	Abierta- Confinada	Convexa	28680	Moderado	44854
ID_85	26089	357	1	1	48%	96,3%	2,6 %	1,1%	Oeste	Suroeste	Abierta	Convexa	12383	Moderado	25132
ID_86	10342	101	1	1	67%	96,3%	0,2 %	3,5%	Noroeste	Oeste	Abierta	Convexa	6721	Bajo	9955

Fuente: Elaboración propia

ANEXO XX Metodología y Teoría Método Peso de la Evidencia

El método Peso de la Evidencia es un método cuantitativo utilizado para combinar set de datos, basado en el Teorema de Bayes de probabilidad condicional (Bonham-Carter, 1994). Este método utiliza una forma logarítmica del modelo probabilístico de Bayes para estimar la importancia relativa de las evidencias de manera estadística. Este método fue desarrollado originalmente para diagnósticos médicos, siendo posteriormente adaptado por el Servicio Geológico de Canadá para el desarrollo de mapas de futuros focos de exploración minera. Posteriormente, Lee et al. (2002) aplica este método en el desarrollo de mapas de susceptibilidad de deslizamientos.

El método Peso de la Evidencia asigna un peso a cada factor condicionante de un evento cualquiera A, a partir de las evidencias disponibles (esto es, ocurrencia del evento A dada la presencia de el (los) factor(es) condicionante(s)). En este trabajo el evento a estudiar es la ocurrencia de deslizamientos y su relación con los diversos factores condicionantes de estos: pendiente, geología, exposición, etc.

Este método consiste principalmente en calcular la probabilidad *a posteriori* de que ocurra una remoción en masa RM dada la presencia de uno o más predictores binarios B (factores condicionantes). Para realizar este cálculo se utiliza un mapa de evidencias (mapa inventario de remociones en masa) y mapas de predictores (que en este caso corresponden a factores condicionantes de remociones en masa, como la pendiente, geología, exposición y curvatura). En base a la relación espacial entre estos distintos mapas se calculan las probabilidades antes mencionadas.

Un predictor Binario

En primer lugar se definirá el método peso de la evidencia para un predictor binario y luego para múltiples predictores binarios, basado en la metodología propuesta por Lee et al. (2002) y Bonham – Carter (1994).

Sea un área de estudio de $A (T) \text{ m}^2$, dividida en celdas unitarias de $u \text{ m}^2$, con un total de $N (T)=A (T)/u$ celdas unitarias. Dentro de esta área $A (t)$, se encuentran $N (RM)$ puntos con una ocurrencia RM (*deslizamientos o remociones en masa*). Este dominio RM corresponde a un número entero y es independiente de u . Luego, la probabilidad *a priori* de la ocurrencia de un deslizamiento se expresa como:

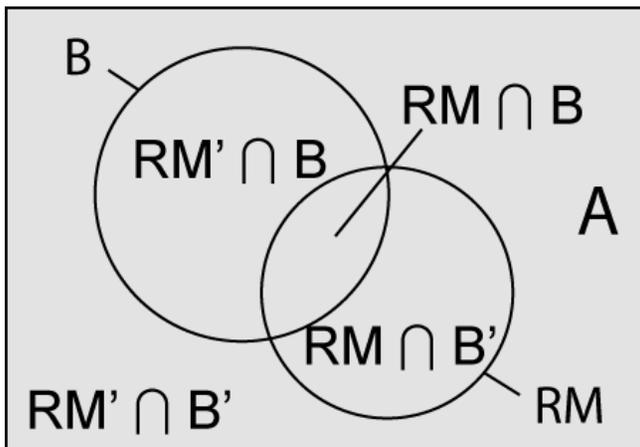
$$P(RM) = \frac{N(RM)}{N(T)} \quad (1)$$

Supongamos que un número conocido de remociones en masa ocurren preferencialmente junto con un predictor B, i.e., en $N (RM \cap B)$ celdas (ver figura A5-1). Además este predictor B es binario, esto

es, puede estar presente o ausente. Este predictor ocupa $N(B)$ celdas si se encuentra presente y $N(B')$ en caso contrario, y cumple la siguiente condición:

$$N(B) + N(B') = N(T) \quad (2)$$

Figura A9-1 Diagrama de Venn explicando de manera simple los calculos realizados por el método peso de la evidencia. A: Área, B predictor binario presente, B' predictor binario ausente, RM remoción en masa presente, RM' Remoción en masa ausente.



Fuente: Elaboración propia

Luego la probabilidad de encontrar una remoción en masa dada la presencia del predictor puede expresarse utilizando el Teorema de Bayes como:

$$P(RM / B) = \frac{P(RM \cap B)}{P(B)} = P(RM) \cdot \frac{P(B / RM)}{P(B)} \quad (3)$$

Del mismo modo, la probabilidad de encontrar una remoción en masa dada la ausencia del predictor será:

$$P(RM / B') = \frac{P(RM \cap B')}{P(B')} = P(RM) \cdot \frac{P(B' / RM)}{P(B')} \quad (4)$$

También se define $P(B/RM)$ y $P(B'/RM)$ como las probabilidades *a posteriori* de estar dentro o fuera del predictor B dada la presencia de una remoción en masa. Finalmente $P(B)$ y $P(B')$ se definen como la probabilidad *a priori* de estar dentro o fuera del patrón predictor B, respectivamente.

El mismo modelo puede ser expresado en una formulación de *Odds*(O), donde se define un odd como $O=P/(1-P)$. Al reescribir las ecuaciones (3) y (4) como odds se tiene:

$$O(RM / B) = O(RM) \cdot \frac{P(B / RM)}{P(B)} \quad (5)$$

$$O(RM / B') = O(RM) \cdot \frac{P(B' / RM)}{P(B')} \quad (6)$$

Donde $O(RM/B)$ y $O(RM/B')$ son los odds *a posteriori* de una remoción en masa dada la presencia o ausencia de un patrón predictor B, respectivamente. $O(RM)$ se define como un odd a priori de una remoción en masa.

El peso del predictor binario B se define como:

$$W^+ = \ln \frac{P(B / RM)}{P(B / RM')} \quad (7)$$

$$W^- = \ln \frac{P(B' / RM)}{P(B' / RM')} \quad (8)$$

Reescribiendo la ecuación (7) y (8):

$$\ln O(RM / B) = \ln O(RM) + W^+ \quad (9)$$

$$\ln O(RM / B') = \ln O(RM) + W^- \quad (10)$$

2 o mas predictores binarios

Si ahora se tienen 2 predictores binarios, B1 y B2, se puede demostrar que la probabilidad a posteriori de una remoción en masa dada la presencia de dos predictores es:

$$P(RM / B1 \cap B2) = \frac{P(B1 \cap B2 / RM)P(RM)}{P(B1 \cap B2 / RM)P(RM) + P(B1 \cap B2 / RM')P(RM')} \quad (11)$$

Si B1 y B2 son independientes el uno del otro con respecto a un set de evidencias, tenemos que:

$$P(B1 \cap B2 / RM) = P(B1 / RM) P(B2 / RM) \quad (12)$$

Simplificándose la ecuación 11 a:

$$P(RM / B1 \cap B2) = P(RM) \frac{P(B1 / RM)}{P(B1)} \frac{P(B2 / RM)}{P(B2)} \quad (13)$$

Si dos o más predictores binarios, independientes el uno del otro con respecto a la remoción en masa, ellos pueden agregarse. Luego la expresión general en Odds, para B_j ($j=1, 2, \dots, n$) predictores binarios es:

$$\ln O(RM / B1^k \cap B2^k \cap B3^k \dots Bn^k) = \sum_{j=1}^n W_j^k + \ln O(RM) \quad (14)$$

donde el superíndice k es positivo o negativo dependiendo si el predictor binario esta ausente o presente, respectivamente. Los Odds finalmente pueden transformarse a probabilidades usando la relación $P=O/(1+O)$.

El peso (W) provee una medida de la asociación espacial entre los puntos donde hay o no hay predictor B y la evidencia (RM). Un peso es calculado para cada clase de cada factor o tema. Si el valor de W es positivo indica que hay más puntos en la clase donde ocurren remociones en masa. En caso contrario, si el valor es negativo, hay menos puntos en la clase que favorecen la remoción en masa. Si el valor de W es cero, o cercano a cero, indica que los puntos están distribuidos aleatoriamente con respecto a la clase. Para mapas binarios, con solo dos "pesos", W^+ y W^- , se define el contraste C entre ambos como:

$$C = W^+ - W^- \quad (15)$$

La generalización a mapas no binarios (esto es, el predictor puede tener distintas clases) es directa, ya que se puede considerar cada clase como un predictor binario.

Finalmente, se define el INDICE DE SUSCEPTIBILIDAD de ocurrencia de remociones en masa (ISRM) como:

$$ISRM = \sum_i C_i \quad (16)$$

Un valor alto de ISRM significa una mayor susceptibilidad y un valor bajo de ISRM una baja susceptibilidad de ocurrencia de FRM. Por lo general un ISRM sobre 2 se considera importante estadísticamente (Lee et al., 2002).

REFERENCIAS

Bonham-Carter, G., 1994. Geographic information systems for geoscientists, modeling with GIS. Pergamon, Oxford

Lee, S., Choi, J., Min, K., 2002. Landslide susceptibility analysis and verification using the Bayesian probability model. Environmental Geology, Vol. 43, N° 1-2, p. 120-131