



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**  
**DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA**



**ESTUDIO DE SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN MASA  
EN LAS CERCANÍAS DEL CANAL ABANICO, COMUNA DE  
ANTUCO, REGIÓN DEL BIOBÍO.**

**Memoria para optar al Título de Geólogo**

**Carlos Jesús Friz Cifuentes**

**Profesor Guía:** Dr. Jorge Andrés Quezada Flory  
**Profesional Co-Guía:** Francisco Alonso Alegría Alegría  
**Profesor de Comisión:** Prof. Ramiro Ulises Bonilla Parra

**Concepción, 2024**

*En dedicatoria a mis padres Juan y Rosa, quienes me dieron la vida y los medios para llegar a esta instancia, a mi hermana María Soledad por su guía y ayuda a través de los años, a mi hermana Trinidad y mi sobrina Martina por enseñarme el valor de educar y enseñar a otra persona y a quienes espero haber guiado e inspirado a seguir sus sueños como yo lo hago, a mis abuelas Estela y Benilda, quienes también me formaron como persona, especialmente en mi infancia, a mis amigos más cercanos por estar conmigo en mis mejores y peores momentos. Y especialmente a mi tío Rigoberto Antonio Obrequé Cisterna y mi padrino Sergio Hernán Cifuentes Valenzuela que me vieron comenzar mi camino como estudiante y lamentablemente no pueden compartir conmigo su final.*

# ÍNDICE

	Página
RESUMEN .....	
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. OBJETIVOS .....	3
1.1.1. Objetivo General .....	3
1.1.2. Objetivos Específicos .....	4
1.2. UBICACIÓN Y ACCESOS .....	4
1.3. PROBLEMÁTICA ACTUAL .....	5
1.4. AGRADECIMIENTOS .....	5
2. GEOMORFOLOGÍA .....	6
2.1. GENERALIDADES .....	6
2.2. GEOMORFOLOGÍA LOCAL .....	8
2.2.1. Restos del macizo andino .....	8
2.2.2. Valles, lagunas y glaciares .....	8
2.2.2.1. Valles .....	8
2.2.2.2. Lagunas .....	9
2.2.2.3. Glaciares .....	10
2.3.2. Estructuras volcánicas .....	10
2.3. UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS .....	10
2.3.1. Terrazas fluviales .....	10
2.3.2. Llanuras de sedimentación .....	11
2.3.3. Llanura aluvial .....	11
2.3.4. Abanico aluvial .....	11
2.3.5. Cono volcánico .....	11
2.3.6. Valles en forma de U .....	11
3. MARCO GEOLÓGICO .....	12
3.1. GENERALIDADES .....	12
3.2. ROCAS ESTRATIFICADAS .....	12
3.2.1. Formación Cura-Mallín .....	12
3.2.2. Formación Trapa-Trapa .....	13
3.2.3. Formación Cola de Zorro .....	13
3.2.4. Volcanes y flujos lávicos .....	14
3.2.5. Depósitos no consolidados .....	14
3.3. ROCAS INTRUSIVAS .....	15
3.3.1. Stocks de granodiorita-diorita .....	15
3.3.2. Stocks de riodacita .....	15
3.3.3. Stocks y filones andesítico-basálticos .....	15
3.4. GEOLOGÍA LOCAL .....	16
4. MARCO GEOTECTÓNICO .....	17
4.1. GENERALIDADES .....	17
4.2. CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE FALLA LIQUIÑE-OFQUI (ZFLO)	17
5. FUNDAMENTOS DE REMOCIONES EN MASA .....	20
5.1. DEFINICIÓN DE CONCEPTOS ASOCIADOS AL RIESGO .....	20
5.2. REMOCIONES EN MASA .....	21
5.2.1. Tipos de remociones en masa .....	22

5.2.2. Factores condicionantes y desencadenantes .....	25
5.2.2.1. Factores condicionantes .....	25
5.2.2.2. Agentes desencadenantes .....	28
6. TRABAJO EN TERRENO .....	29
6.1. OBSERVACIONES GENERALES .....	29
6.1. DESCRIPCIÓN DE SUELO .....	29
7. ANALISIS DE SUCEPTIBILIDAD .....	31
7.1. ANÁLISIS DE RELIEVE .....	31
7.1.1. Elevación .....	31
7.1.2. Orientación de laderas .....	32
7.1.3. Pendiente de laderas .....	33
7.2. MAPAS RECLASIFICADOS.....	34
7.2.1. Mapa de elevación .....	34
7.2.2. Mapa de pendiente de laderas .....	35
7.2.3. Mapa de orientación de laderas .....	35
7.3. MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD CALCULADO .....	36
7.4. REDES DE DRENAJE .....	37
7.5. FACTORES ADICIONALES NO MAPEABLES .....	38
7.6. INVENTARIO DE REMOCIONES EN MASA .....	39
8. RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....	43
9. RECOMENDACIONES .....	44

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página	
1	1	Ubicación espacial del área de estudio.	3
2	1	Mapa de unidades geomorfológicas de la región del Biobío.	5
2	2	Vista del volcán Antuco y Sierra velluda desde el valle del río Laja.	6
2	3	Valle del río Laja desde el costado del canal Abanico.	8
2	4	Laguna Laja vista desde su orilla occidental.	8
2	5	Sierra Velluda vista desde Huépil.	9
3	1	Basaltos columnares y Salto Trubunleo.	15
4	1	Mapa Geotectónico de Chile.	17
5	1	Partes de una remoción en masa.	21
5	2	Dibujo esquemático de una caída de roca.	21
5	3	Dibujo esquemático de un volcamiento.	22
5	4	Dibujo esquemático de un deslizamiento rotacional.	22
5	5	Dibujo esquemático de un deslizamiento traslacional.	23
5	6	Dibujo esquemático de una extensión lateral.	23
5	7	Dibujo esquemático de un flujo.	24
5	8	Relación entre factores condicionantes y el tipo de remoción.	27
7	1	Mapa de elevación del terreno.	30
7	2	Mapa de orientación de laderas.	31
7	3	Mapa de pendiente de laderas.	32
7	4	Mapa de elevación reclasificado.	33
7	5	Mapa de pendiente reclasificado.	34
7	6	Mapa de orientación de laderas reclasificado.	35
7	7	Mapa de susceptibilidad calculada.	36
7	8	Remoción al costado del canal abanico.	37
7	9	Remoción con presencia de agua corriente.	38
7	10	Vista satelital del área de estudio.	38
7	11	Remoción en masa con contenido vegetal y cobertura nival.	39
7	12	Suelo con alto contenido de arcilla.	40
7	13	Remoción con evidencia de medidas de mitigación.	41

## RESUMEN

El estudio aborda la problemática de remociones en masa en la ladera norte de un canal artificial ubicado en la ladera septentrional del Río Laja, en la zona cordillerana de la comuna de Antuco, Región del Biobío. Este canal es clave para transportar agua desde el río Laja hacia una central hidroeléctrica ubicada en el sector, pero su proximidad a terrenos inestables lo expone a peligros como desprendimientos de roca y deslizamientos, que pueden afectar la operación y dañar la infraestructura.

El objetivo principal es evaluar la susceptibilidad de estas remociones, integrando análisis geológicos, geomorfológicos y estructurales para identificar áreas vulnerables, factores condicionantes y desencadenantes, como las lluvias intensas registradas entre abril y junio de 2024. Esto permitirá confeccionar un mapa de susceptibilidad y proponer medidas de mitigación para proteger el correcto funcionamiento del canal.

La zona de estudio está en la Cordillera Andina, caracterizada por depósitos no consolidados de origen volcánico, fluvial y glacial, que cubren la ladera norte del canal. El análisis geomorfológico destaca pendientes pronunciadas, orientaciones de laderas que favorecen la acumulación de nieve, y suelos saturados de agua, que son factores críticos en la generación de deslizamientos. Además, la vegetación, aunque relevante, no siempre estabiliza el terreno, especialmente en áreas con árboles grandes que contribuyen al desprendimiento de material.

A través de mapas de elevación, pendiente y orientación, el estudio identifica zonas de susceptibilidad media a alta, especialmente en sectores del canal con pendientes mayores al 20% y suelos arcillosos que acumulan agua. También se documentan remociones específicas, clasificadas según su extensión, contenido de vegetación y agua, y tipo de movimiento, como deslizamientos rotacionales.

Finalmente, se enfatiza la necesidad de implementar estrategias de mitigación, como mejorar el drenaje, estabilizar las laderas y optimizar el manejo de la vegetación. Este enfoque integral busca reducir riesgos sobre la obra de aducción encargada de conducir las aguas hacia una central hidroeléctrica ubicada en el sector del área de estudio antes identificado.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las remociones en masa constituyen un fenómeno geológico de gran relevancia en el análisis de peligros naturales, especialmente en regiones montañosas y de alta pendiente. Estos procesos, que involucran el desplazamiento de material suelto debido a la acción de la gravedad, pueden verse influenciados por factores geomorfológicos, climáticos y antrópicos. En Chile, la presencia de terrenos volcánicos, una orografía accidentada y eventos climáticos extremos hacen que la ocurrencia de remociones en masa sea un problema recurrente que debe ser estudiado y mitigado para evitar daños en la infraestructura de la zona.

Este estudio se centra en la evaluación de la susceptibilidad de remociones en masa en las cercanías de un canal de construcción antrópica, ubicado en la comuna de Antuco, Región del Biobío. Dicho canal, que transporta agua tomada del río Laja, se encuentra en una zona caracterizada por la presencia de depósitos no consolidados de origen volcánico, fluvial y glacial. La combinación de estos materiales con fuertes pendientes, saturación hídrica y factores climáticos como lluvias intensas ha generado episodios de deslizamientos y desprendimientos de material en diversas ocasiones. Estos eventos representan un peligro significativo para la infraestructura y el correcto funcionamiento del canal, lo que hace necesario un análisis detallado de los factores que los condicionan y desencadenan.

A lo largo del estudio, se utilizaron metodologías basadas en el análisis geomorfológico, geológico y estructural de la zona, complementadas con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Se generaron mapas de elevación, pendiente y orientación de laderas, los cuales permitieron identificar áreas con mayor susceptibilidad a deslizamientos. Adicionalmente, se analizaron factores no cartografiados, como la influencia de la vegetación y la saturación de agua en el suelo, elementos clave en la estabilidad del terreno.

El presente trabajo no solo busca identificar las zonas más vulnerables, sino también generar conocimiento que contribuya a la implementación de medidas de mitigación efectivas. Entre las estrategias recomendadas se incluyen el mejoramiento del drenaje superficial y subterráneo, la reforestación con especies de raíces más profundas y la estabilización de laderas con estructuras de

contención. Estas acciones permitirían reducir los impactos negativos de las remociones en masa y garantizar la seguridad de la infraestructura y continuidad del proceso.

A través de este informe, se pretende aportar a la comprensión de los procesos de remoción en masa en el área de estudio, destacando la importancia de una planificación territorial basada en el conocimiento geológico y geomorfológico. La integración de estos análisis con estrategias de mitigación adecuadas resulta fundamental para la gestión de riesgos y la preservación de la infraestructura crítica en regiones expuestas a fenómenos de inestabilidad del suelo.

## **1.1. OBJETIVOS**

### **1.1.1. Objetivo General**

- Realizar un estudio de susceptibilidad de remociones en masa que pudieran afectar al correcto funcionamiento del canal artificial que se desprende del río Laja, comuna de Antuco, región de, Biobío.

### **1.1.2. Objetivos Específicos**

- Reconocer remociones en masa en terreno, dentro del área de estudio.
- Integrar la información geológica, geomorfológica y estructural para definir zonas susceptibles a sufrir remociones en masa.
- Determinar los factores condicionantes y potencialmente detonantes de remociones en masa.
- Confeccionar un mapa de susceptibilidad de ocurrencia de remociones en masa para la zona donde se emplaza el canal.
- Proponer medidas de seguridad o mitigación, para reducir posibles riesgos hacia la obra de aducción encargada de conducir las aguas hacia una central hidroeléctrica ubicada en el sector.

## 1.2. UBICACIÓN Y ACCESOS

El área de estudio se encuentra en la zona cordillerana, en la cuenca alta del río Laja, a unos 17 kilómetros al este de Antuco, en la comuna homónima, región del Biobío. Es posible acceder al área de estudio mediante la ruta Q-45 conocida como camino Los Angeles-Laguna Laja, sin embargo se prefirió acceder desde la localidad de Polcura, comuna de Tucapel, siguiendo la ruta N-995 hacia el este, hasta llegar al camino Rayenco, sin desviarse de su ruta principal hasta llegar al camino que bordea el canal.

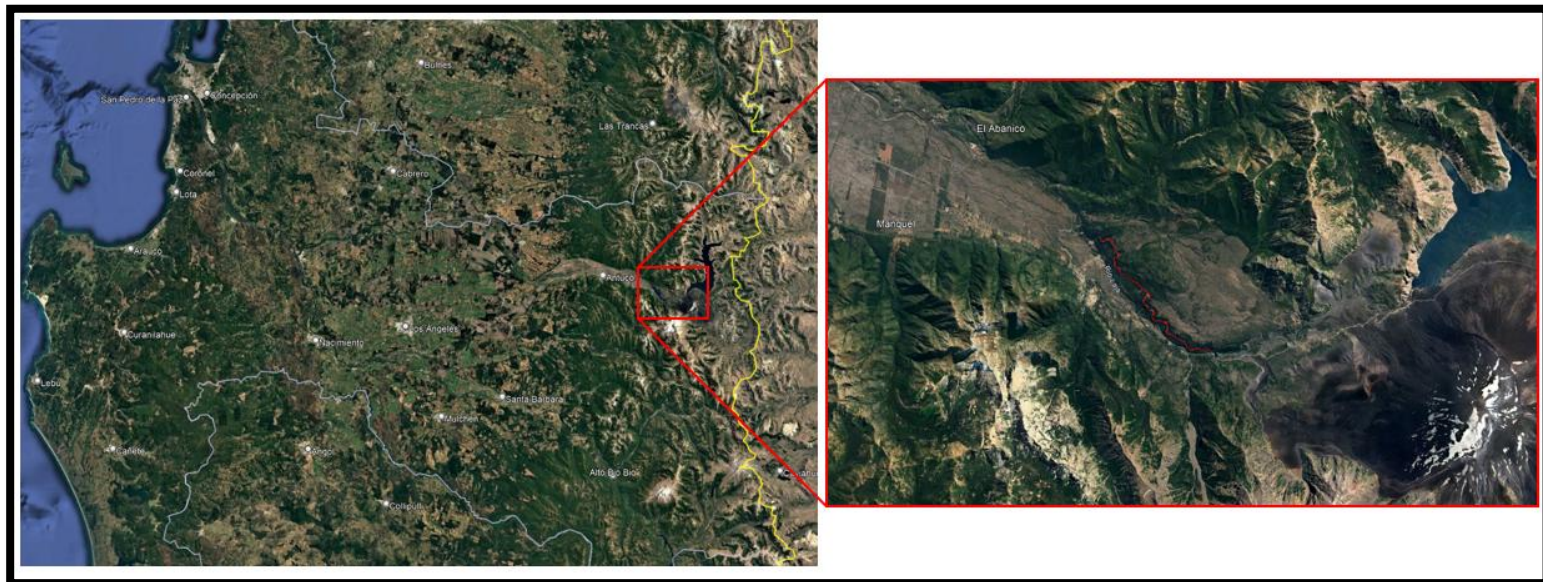


Figura 1.2: Ubicación espacial del área de estudio

## 1.3. PROBLEMÁTICA ACTUAL

La problemática principal de este estudio se enfoca en los peligros que los deslizamientos de material en las laderas cercanas al canal, el cual es vulnerable debido a la proximidad de terrenos inestables. Los deslizamientos, compuestos por tierra, rocas y sedimentos, pueden obstruir el canal, alterar el flujo hídrico y dañar componentes críticos del sistema.

Un agente desencadenante clave de estos fenómenos son las precipitaciones intensas, como las ocurridas entre abril y junio de 2024, las cuales provocaron nuevas remociones de material en la ladera norte del canal. Estos eventos resaltan la vulnerabilidad del terreno y la necesidad de comprender mejor los factores que los originan.

En este sentido, es fundamental aportar con estudios específicos en la zona que analicen en profundidad las características geológicas de las laderas e identificar los mecanismos que desencadenan estos deslizamientos. Esto subraya la importancia de realizar un análisis detallado para caracterizar los materiales involucrados, las causas de los deslizamientos y desarrollar estrategias efectivas de mitigación.

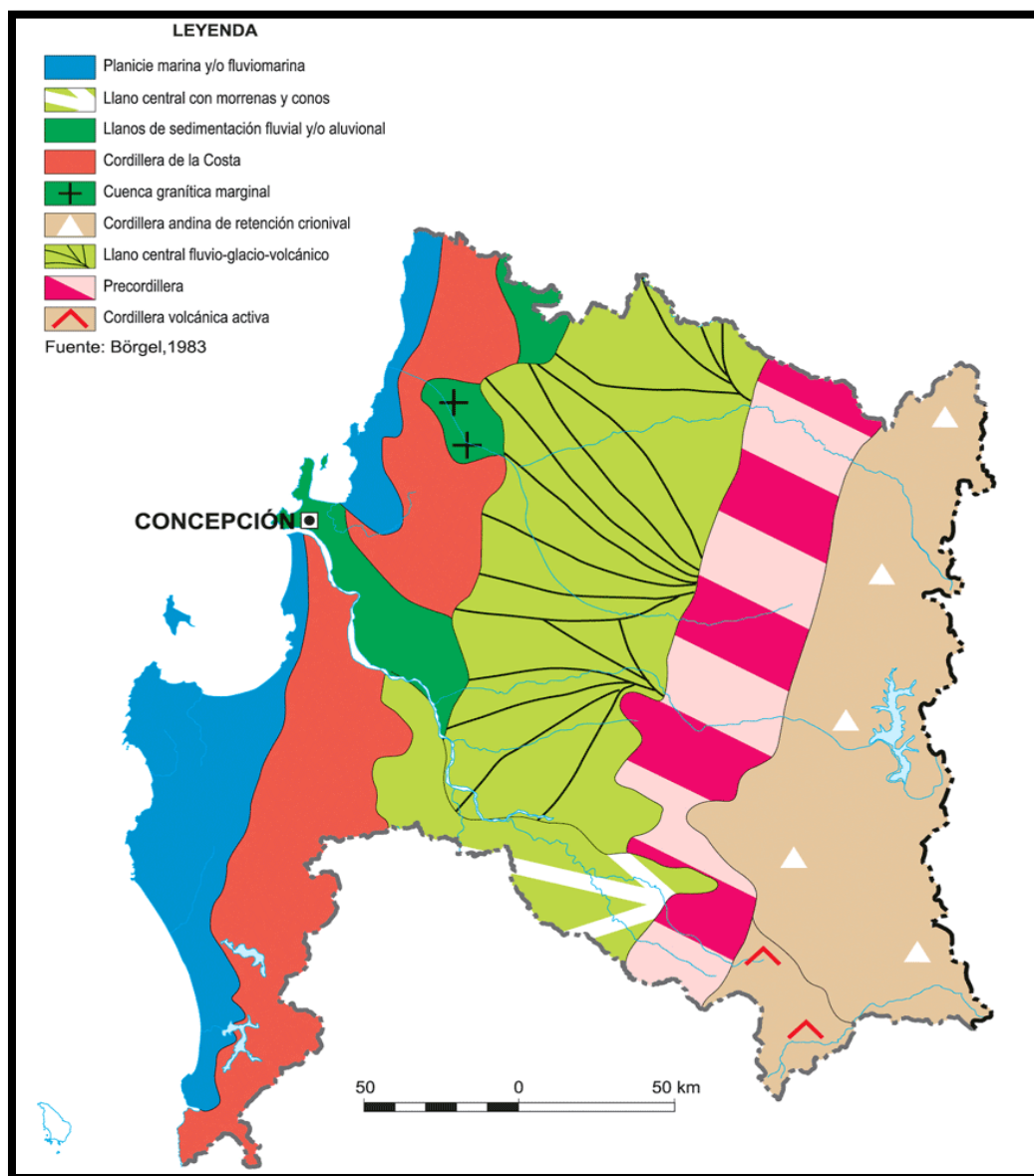
#### **1.4. AGRADECIMIENTOS**

Quisiera agradecer sinceramente a todos quienes fueron parte de mi formación académica profesional y a los miembros del Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Concepción. En particular agradezco el apoyo y las gestiones por parte de la Dra. Verónica Pineda Mascayano, Dr. Jorge Quezada Flory y Don Pedro Bravo por su ayuda y apoyo en la coordinación y desarrollo del trabajo de terreno y las gestiones necesarias para este trabajo. Agradezco también a Franco y Diego Bilz por permitirme cohabitar con ellos en el que llamé por años mi segundo hogar. Agradecer, por último, pero no por ello con menor aprecio a mi familia por su apoyo incondicional a través de toda mi vida, y a mis amigos que igualmente han sido parte crucial de mi desarrollo tanto personal como profesional.

## 2. GEOMORFOLOGÍA

### 2.1. GENERALIDADES

En 1983, Reinaldo Börgel clasificó la geomorfología de Chile en cinco grandes macroformas, cada una de las cuales presenta características fisiográficas distintivas, influenciadas mayormente por la litología presente, el clima de la zona y los diferentes fenómenos naturales que han moldeado estas unidades (Figura 2.1).



**Figura 2.1:** Mapa de unidades geomorfológicas de la región del Biobío (modificado de Börgel, 1983)

El área de estudio queda contenida dentro de la así llamada “región central lacustre y del llano glacio-volcanico”, esto tiene sentido si se observa la zona, pudiendo reconocerse características del terreno propias de los valles glaciales, fluviales y gran cantidad de material de origen volcánico. Más específicamente, la zona de emplazamiento de las obras de aducción se encuentra dentro de la Cordillera Andina de retención crio-nival. El mismo Börgel (1983) distingue en las antiguas fronteras de la región del Biobío nueve subregiones morfológicas: Planicie marina y fluviomarina; Llano central con morrenas y conos; Llanos de sedimentación fluvial y aluvional; Cordillera de la costa; Cuenca granítica marginal; Cordillera andina de retención crio-nival; Llano central fluvio-glacio-volcánico; precordillera y Cordillera volcánica activa.

Para efectos del presente estudio, solo es de interés la subregión que contiene al área de estudio, es decir la Cordillera andina de retención crio-nival, que consiste en un paisaje modelado por la actividad volcánica del pasado, siendo el cimientado de la misma rocas intrusivas y volcánicas moldeadas luego por la acción glacial y nival principalmente y en menor medida por fenómenos fluviales, siendo claramente observables valles en forma de “U” característicos de la acción glacial. Dentro de esta subregión podemos encontrar volcanes como el volcán Chillán o Antuco y grandes cumbres como la Sierra Velluda, estos últimos dos visibles desde la zona de estudio (figura 2.2).



**Figura 2.2: Vista del volcán Antuco (izquierda) y Sierra velluda (derecha) desde el valle del río Laja.**

## **2.2. GEOMORFOLOGÍA LOCAL.**

Para describir las principales características topográficas de la zona, González-Ferrán y Vergara (1962) dividen el tramo cordillerano en tres unidades morfológicas clave, que están relacionadas entre sí por lo diversos fenómenos que las originan y moldean, siendo estas: restos del macizo Andino; Valles, lagunas y glaciares; y estructuras volcánicas.

### **2.2.1. Restos del macizo andino.**

Esta unidad se compone mayormente por formaciones del Mesozoico, Terciario y cuerpos intrusivos diversos. La altitud promedio se encuentra entre los 2.000 y 2.500 metros sobre el nivel del mar.

El macizo ha sido intensamente erosionado y fragmentado, principalmente por la actividad glacial del Pleistoceno y la acción fluvial actual. Esto ha generado valles transversales amplios y profundos, donde permanecen montañas aisladas cuyo relieve está controlado por la litología dominante y las estructuras geológicas presentes.

Los procesos que dieron origen a las montañas también produjeron unidades sedimentarias plegadas que dan lugar a formas de relieve particulares, como es el caso del pliegue anticlinal volcado de Curamallín, que se encuentra a pocos kilómetros del área de estudio. La erosión diferencial ha esculpido formaciones inusuales en las rocas volcánicas, tales como torreones y estructuras tipo hongo.

### **2.2.2. Valles, lagunas y glaciares.**

#### **2.2.2.1. Valles.**

Son las formas de relieve más grandes de la región, originadas por la erosión glacial y fluvial. Se caracterizan por niveles aterrazados compuestos por sedimentos fluviales o glaciofluviales, que cubren la vaguada principal y forman planicies que se extienden hacia la precordillera y el valle central (figura 2.3).



**Figura 2.3: Valle del rio Laja visto desde el costado del canal Abanico.**

#### **2.2.2.2. Lagunas.**

La mayoría de estas lagunas se encuentran en pequeñas cuencas que tienen un origen tanto glaciar como tectónico (Börgel, 1983). Estas cuencas se han cerrado por sedimentos glaciares o materiales volcánicos, y algunas lagunas se han formado en los valles debido a estos últimos. Existen muchas pequeñas lagunas en depresiones volcánicas cuaternarias. Un alineamiento N-S de estas cuencas, acompañado de edificios volcánicos, es una característica distintiva de la región. (figura 2.4)



**Figura 2.4: Laguna Laja vista desde su orilla occidental.**

### 2.2.2.3. Glaciares.

Según González-Ferrán y Vergara (1962), la línea de nieve persistente se encuentra entre las cotas de 3100 y 2700 metros sobre el nivel del mar, lo cual concuerda con los estudios de Lliboutry (1965). Esto significa que la mayoría de los glaciares y campos de nieve permanentes están limitados a las cumbres volcánicas más prominentes. Los volcanes Callaqui y Copahue contienen manifestaciones glaciares, con los campos de nieve del Callaqui descendiendo hasta los 1.900-2.100 metros sobre el nivel del mar, también se puede observar cobertura nival o glacial permanente en lo más alto de la cumbre Sierra Velluda, siendo visible incluso desde localidades como Huépil (Figura 2.5).

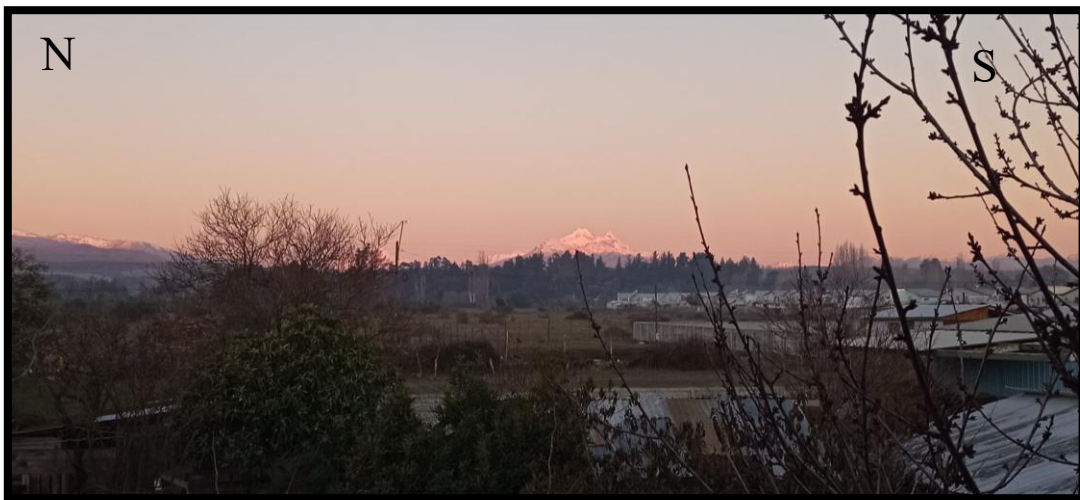


Figura 2.5: Sierra velluda vista desde Huépil.

### 2.2.3. Estructuras volcánicas.

Grandes edificios volcánicos se encuentran a lo largo de la cordillera, con cumbres que alcanzan los 4.000 metros en el norte y hasta los 3.400 metros en las zonas más australes. En la zona estudiada destaca el volcán Antuco, visible desde el área de trabajo, pudiendo apreciarse los remanentes de un edificio volcánico mayor, dentro del cual se emplaza el actual cono volcánico.

## 2.3. UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS.

### 2.3.1. Terrazas fluviales.

Superficie plana con forma de meseta, originada por el encajonamiento de un río en su antigua llanura de inundación. A medida que esto ocurre, la antigua llanura queda en una posición más elevada que la actual. Estas superficies suelen ubicarse a ambos lados del río y a la misma altitud.

Si hay más de un nivel de terrazas, se infiere que el valle ha experimentado varios episodios de encajonamiento, donde las terrazas más altas corresponden a los episodios más antiguos.

### **2.3.2. Llanuras de sedimentación.**

Área plana ubicada por encima y a ambos lados del cauce de un río. Se forma por la acumulación de sedimentos debido a la acción lateral de la corriente, cuando el cauce se encuentra más cercano a su nivel de base.

### **2.3.3. Llanura aluvial.**

Desde un punto de vista morfodinámico, se refiere a las zonas que quedan cubiertas por el agua durante las crecidas, las cuales ocurren tras precipitaciones intensas y prolongadas.

### **2.3.4. Abanico aluvial.**

Depósito de sedimentos en forma de abanico, que se genera cuando una corriente de agua pierde velocidad y capacidad de transporte al pasar de un valle angosto en una región montañosa a una zona de menor pendiente en la llanura.

### **2.3.5. Cono volcánico.**

Se forma por la acumulación de lavas y depósitos piroclásticos. Estos edificios suelen ser muy estables, ya que los flujos de lava protegen las capas subyacentes de depósitos piroclásticos contra la erosión.

### **2.3.6. Valles en forma de U.**

Con fondo plano, se originan por el movimiento de un glaciar, y solo se hacen visibles cuando el hielo se retira.

## **3. MARCO GEOLÓGICO**

### **3.1. GENERALIDADES**

El área de estudio está ubicada en la cordillera de los Andes, específicamente en la ladera occidental de esta, dentro de la región del Biobío, en la provincia del mismo nombre y la comuna de Antuco. El paisaje de la zona está principalmente dominado por grandes edificios volcánicos y los productos derivados de su actividad, además de sedimentos fluviales recientes transportados por el río Laja y sus afluentes.

Según la Hoja Laguna la Laja (Niemeyer y Muñoz, 1983), la región que abarca el área de estudio incluye cinco unidades de rocas estratificadas, cuyas edades varían desde el Eoceno hasta el Cuaternario. Estas unidades son: la Formación Cura-Mallín, que a su vez se divide en dos miembros: el miembro superior (Río Queuco) y el miembro inferior (Malla-Malla), la Formación Trapa-Trapa, la Formación Cola de Zorro, así como volcanes, flujos lávicos y depósitos asociados.

Las formaciones terciarias mencionadas anteriormente están intruidas por cuerpos de roca con textura porfídica, de composición que va desde diorítica hasta andesítica. Estas intrusiones tienen edades comprendidas entre el Mioceno superior y el periodo que abarca desde el Plioceno hasta el Pleistoceno (Niemeyer y Muñoz, 1983). Estos cuerpos intrusivos aportan una complejidad adicional al paisaje geológico de la región, evidenciando una historia prolongada de actividad volcánica e intrusiva que ha moldeado la estructura actual del terreno.

### **3.2. ROCAS ESTRATIFICADAS**

#### **3.2.1. Formación Cura-Mallín. (Eoceno-Mioceno)**

La Formación Cura-Mallín toma su nombre del estero del mismo nombre y fue descrita por primera vez en 1962 por González y Vergara. En su estudio inicial, diferenciaron esta unidad de la Formación Malla-Malla. Sin embargo, en 1983, Niemeyer y Muñoz, en su investigación sobre la Hoja Laguna de La Laja, integraron la Formación Malla-Malla como el Miembro Superior de la Formación Cura-Mallín. El Miembro Inferior, conocido como Río Queuco, se caracteriza por la

presencia de rocas volcanoclásticas. Cabe destacar que ambos miembros se presentan de manera concordante y en transición gradual uno con el otro (Niemeyer y Muñoz, 1983).

Según los investigadores, la Formación Cura-Mallín se compone de una secuencia de rocas con una estratificación bien definida. La base, correspondiente al Miembro Río Queuco, está formada por tobas brechosas y finas, con una gama de colores que varía entre pardo-verdoso, blanco, morado, verde, rosado y gris claro. Por otro lado, el Miembro Malla-Malla tiene un origen sedimentario-terrágeno y está compuesto por conglomerados, areniscas y lutitas que presentan tonalidades verde-oliva y verde-amarillento, además de contener intercalaciones de material carbonoso y calcáreo.

### **3.2.2. Formación Trapa-Trapa. (Mioceno Medio-Mioceno Superior)**

Niemeyer y Muñoz definieron la Formación Trapa-Trapa como una nueva unidad geológica en su estudio de la Hoja Laguna de La Laja, publicado en 1983. Esta Unidad está constituida por una secuencia de depósitos volcánicos, lavas andesíticas y conglomerados, que se disponen de forma concordante y transicional sobre el Miembro Malla-Malla. En su parte superior, la Formación Trapa-Trapa está delimitada por una discordancia angular con la Formación Cola de Zorro, lo que marca una diferencia geológica significativa entre ambas formaciones.

### **3.2.3. Formación Cola de Zorro. (Plioceno-Pleistoceno)**

Esta Formación fue definida por González y Vergara en 1962, en el cajón homónimo por donde fluye el tributario del río Los Sauces. Está compuesta por una secuencia de rocas que incluyen andesitas, andesitas basálticas y basaltos, con colores que varían entre el gris y el pardo oscuro, además de aglomerados volcánicos en tonos grises, pardos y pardo-amarillentos (Niemeyer y Muñoz, 1983). Los productos volcánicos de esta Formación pertenecen al arco volcánico del Plioceno-Pleistoceno. Sielfeld (2008) identificó cuatro secuencias características dentro de esta Formación:

- a) Secuencia de El Barco: Compuesta por brechas y aglomerados volcánicos, así como lavas basálticas y andesítico-basálticas.
- b) Secuencia de Pemehue: Formada por lavas andesíticas de gran espesor.
- c) Secuencia de Pachá: Conformada por brechas volcánicas, aglomerados y tobas aisladas, además de lavas andesíticas y andesítico-basálticas.

d) Secuencia de Pitril: Caracterizada por lavas basálticas, andesítico-basálticas y andesíticas, con intercalaciones subordinadas de aglomerados y tobas de ceniza y lapilli.

Estas secuencias se encuentran generalmente en afloramientos bien estratificados, dispuestos de manera subhorizontal. Sobre las rocas plegadas de las Formaciones Cura-Mallín y Trapa-Trapa, las secuencias de la Formación Cola de Zorro se encuentran en discordancia angular. Por sobre esta unidad, y separadas por una discordancia de erosión, se disponen las lavas de los volcanes Antuco y Copahue.

#### **3.2.4. Volcanes y flujos lávicos. (Pleistoceno-Holoceno)**

En la Hoja Laguna de La Laja (Niemeyer y Muñoz, 1983), se identifica a los volcanes y flujos de lava del Pleistoceno-Holoceno. Estos se disponen de manera pseudoconcordante o con discordancia de erosión sobre las volcanitas de la Formación Cola de Zorro. Algunas coladas de lava también presentan una disposición discordante angular con respecto a las formaciones Cura-Mallín y Trapa-Trapa. Estas unidades volcánicas están compuestas principalmente por coladas de lava basáltica, andesítica y andesítico-basáltica, con colores que van del negro al gris y pardo-rojizo. Además, se encuentran intercaladas con brechas autoclásticas y depósitos piroclásticos subordinados. El volcán Callaqui, por ejemplo, se sitúa de manera pseudoconcordante sobre las lavas y aglomerados de la Formación Cola de Zorro. Los productos volcánicos de esta zona tienen composiciones que varían entre basáltica, andesítico-basáltica y andesítica.

#### **3.2.5. Depósitos no consolidados.**

Estos depósitos están formados por morrenas, terrazas fluviales o glacio-fluviales, y materiales resultantes de desprendimientos de suelo y roca, como veremos posteriormente son de particular relevancia para efectos de este estudio, pues la ladera norte del canal abanico, donde se concentran las remociones en masa ya ocurridas y potencialmente futuras está cubierta en su totalidad por este tipo de material.

### **3.3. ROCAS INTRUSIVAS.**

#### **3.3.1. Stocks de granodiorita-diorita.**

Niemeyer y Muñoz (1983) emplean esta denominación para referirse a pequeños cuerpos plutónicos que se encuentran intruyendo las formaciones Cura-Mallín y Trapa-Trapa. Estos stocks están recubiertos por las volcanitas pertenecientes a la Formación Cola de Zorro, presentando una discordancia erosiva que indica su relación temporal. A partir de estos datos, se ha determinado que estos cuerpos se formaron durante el Mioceno Superior. Un estudio previo realizado por Pesce en 1981 arrojó una edad K-Ar de  $15 \pm 2$  Ma para una granodiorita ubicada cerca del Paso Los Columpios, lo que está en concordancia con la interpretación geológica de Niemeyer y Muñoz. Desde un punto de vista petrográfico, las rocas que componen estos stocks incluyen principalmente diorita, diorita cuarcífera y granodiorita, lo que sugiere una composición diversificada en el ámbito intrusivo de la región.

#### **3.3.2. Stocks de riodacita.**

En su estudio de la Hoja Laguna de La Laja de 1983, Niemeyer y Muñoz identificaron dos pequeños cuerpos riodacíticos que intruyen tanto la Formación Cura-Mallín como la Formación Trapa-Trapa, al este del estero Cura-Mallín. Estos cuerpos, al igual que los stocks de granodiorita-diorita, están cubiertos por la Formación Cola de Zorro, lo que indica una discordancia erosiva que define su edad geológica, también atribuida al Mioceno Superior. Estos cuerpos intrusivos se caracterizan por su composición riodacítica, lo que les confiere propiedades petrográficas diferenciadas dentro del contexto geológico de la región.

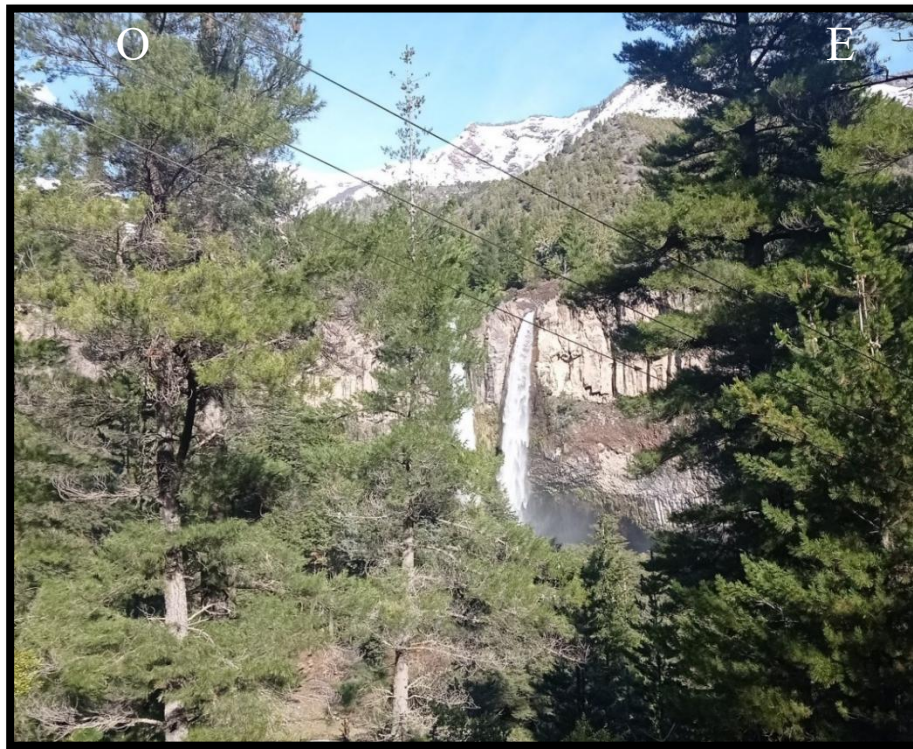
#### **3.3.3. Stocks y filones andesítico-basálticos.**

Esta categoría incluye pequeños cuerpos intrusivos de composición intermedia, los cuales han penetrado las formaciones Cura-Mallín, Trapa-Trapa y Cola de Zorro. Según la investigación de Niemeyer y Muñoz (1983), se les asigna una edad que oscila entre el Plioceno y el Pleistoceno. Sin embargo, los autores no descartan la posibilidad de que algunos de estos cuerpos intrusivos pudieran haber sido emplazados durante el Mioceno, lo que sugiere una variabilidad temporal en su origen. Estos stocks y filones son característicos por su composición andesítico-basáltica, lo que

les otorga una singularidad en cuanto a su estructura y mineralogía dentro del paisaje geológico de la región.

### 3.4. GEOLOGIA LOCAL

Localmente no se observan afloramientos de roca, sino que solamente depósitos de material no consolidado, sin embargo, en la ladera opuesta, es decir la orilla sur del río Laja se pueden observar claramente incluso a la distancia afloramientos de basaltos columnares (figura 3.1), que se encuentran en el área reconocida como formación cola de zorro, sobre los cuales se han depositado sedimentos glaciales, fluviales y volcánicos no consolidados. Estos depósitos se corresponderían con los encontrados en la ladera norte, donde se encuentra el canal en cuestión, por lo tanto, el suelo sobre el cual se emplaza corresponde a productos volcánicos retrabajados por acción glacial y fluvial, esto se puede inferir en base al pequeño tamaño de grano predominante, la presencia de algunos bloques de mayor tamaño en su mayoría redondeados y el gran contenido de material arcilloso.



**Figura 3.1: Basaltos columnares y Salto Trubunleo, vistos desde la ladera opuesta del valle del río Laja.**

## 4. MARCO GEOTECTÓNICO

### 4.1. GENERALIDADES

Desde hace aproximadamente 49 millones de años, ha ocurrido una subducción oblicua dextral en relación con el margen occidental chileno, con la excepción del periodo entre los 26 y 20 millones de años, cuando la subducción fue casi ortogonal (Cembrano *et al.*, 1996). Este fenómeno busca explicar el origen de la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui (en adelante referida como ZFLO), la cual desempeña un papel crucial en el volcanismo cuaternario de la Zona Volcánica Sur (en adelante referida como ZVS).

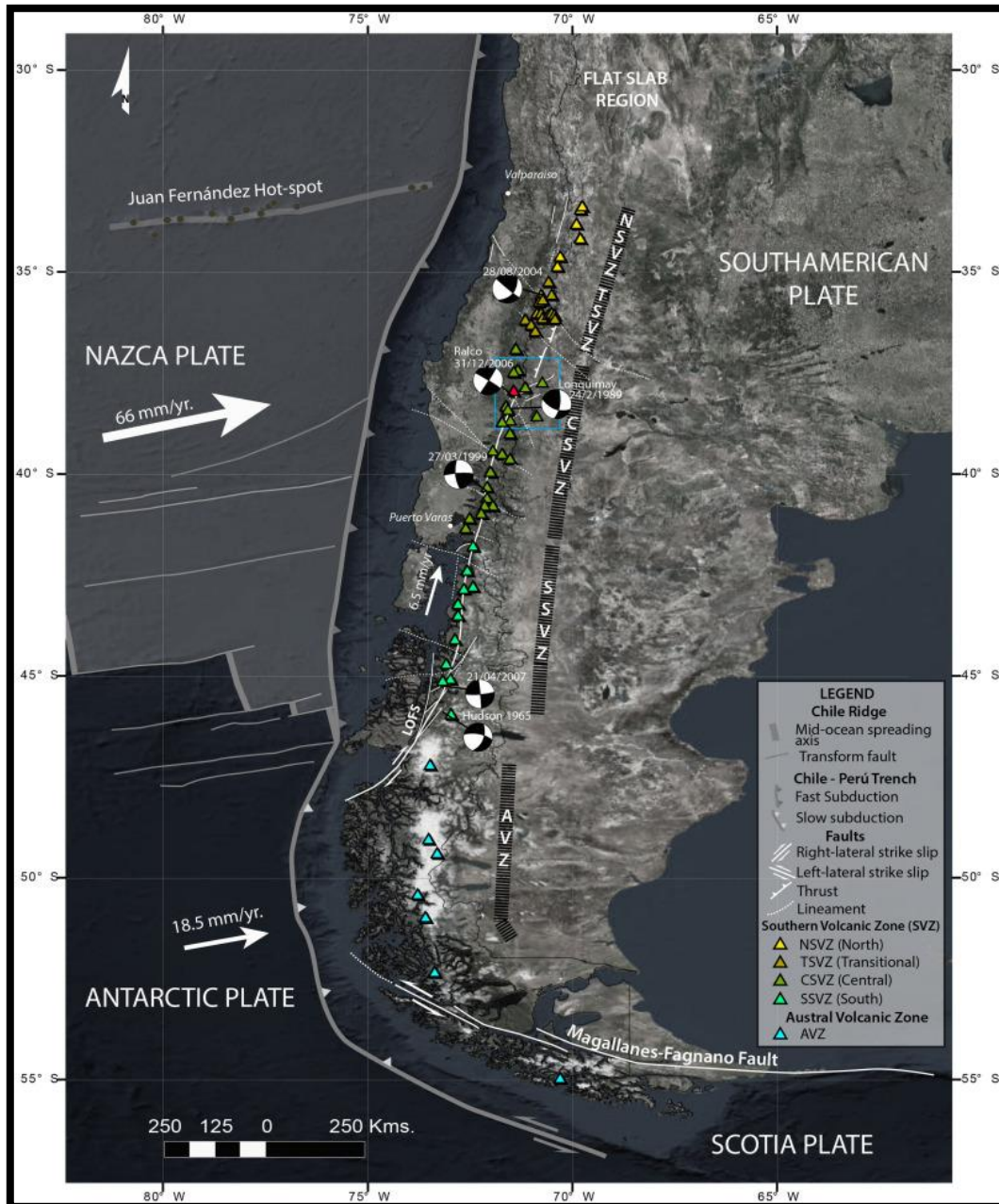
### 4.2. CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE FALLA LIQUIÑE-OFQUI (ZFLO)

La Zona de Falla Liquiñe-Ofqui se extiende aproximadamente 1200 km, desde el Istmo de Ofqui (48°S) hasta al menos el Complejo Volcánico Callaqui-Copahue-Mandolegüe (38°S) (Sielfeld, 2008). Fue descrita inicialmente por Steffen en 1944, y más tarde fue rebautizada como Falla Liquiñe-Reloncaví por Moreno y Parada en 1974. Finalmente, recibió su nombre actual gracias a Hervé *et al.* en 1979.

Se estima que el inicio de la ZFLO se remonta al Mesozoico a lo largo del arco magmático (Cembrano *et al.*, 1996). Sin embargo, durante el Eoceno-Mioceno (48-26 Ma), hubo un reinicio o reactivación de esta estructura, caracterizada por un régimen transpresivo dextral (Lara *et al.*, 2006). Debido a su ubicación paralela a la fosa y a la abundancia de indicadores cinemáticos que muestran desplazamiento horizontal, Lara *et al.* (2006) clasifica la ZFLO como una megafalla dextral a gran escala.

Cembrano *et al.*, (1996) ha identificado tres tipos de lineamientos bien definidos en la zona: el primero consiste en dos lineamientos con dirección NNE que alcanzan cientos de kilómetros de longitud; el segundo incluye cuatro tendencias NE, rectas y en echelón, que tienen una longitud de decenas de kilómetros; y el tercero comprende tres lineamientos curvados en dirección NNW, que también se extienden por cientos de kilómetros.

Un conjunto de sismos de magnitud de hasta 3.8 Mw (figura 4.1) se registró a lo largo de la ZFLO durante un periodo de 11 meses en los años 2006 y 2007. La proximidad de estos sismos a la superficie sugiere que esta gran estructura está en actividad continua (Lange *et al.*, 2008). Desde el Pleistoceno Inferior, la ZFLO ha concentrado parte de la deformación frágil en el arco y ha funcionado como canal de ascenso para los magmas (Lara *et al.*, 2006), lo que resulta relevante dada la sismicidad asociada a estos pulsos magmáticos.



**Figura 4.1:** Mapa geotectónico de Chile. Diagramas de pelota de playa indican el mecanismo focal de los sismos ocurridos a lo largo de la ZFLO (Lange *et al.*, 2008)

Al norte de los 40°S, la ZFLO presenta una serie de lineamientos en echelón que adoptan orientaciones NNE a NE entre los 39° y 38°S. En esta región se intercepta un complejo arreglo geométrico que incluye varios lineamientos en dirección NW, siendo los más destacados aquellos identificados como las fallas Biobío y Lanahue por los autores Folguera *et al.*, 2002; Melnick *et al.*, 2006 y 2008; y Moreno *et al.*, 2008.

## 5. FUNDAMENTOS DE REMOCIONES EN MASA

### 5.1. DEFINICIÓN DE CONCEPTOS ASOCIADOS AL RIESGO

Para comprender adecuadamente el presente estudio, es necesario aclarar y definir una serie de conceptos técnicos que, en el lenguaje cotidiano, a menudo se emplean como sinónimos. A fin de establecer criterios comunes, se presentan las siguientes definiciones según Cardona (1991):

**Amenaza o Peligro (Hazard - H):** Se entiende como la probabilidad de que ocurra un evento potencialmente desastroso en un lugar específico durante un determinado periodo de tiempo.

**Vulnerabilidad (V):** Se define como el grado de pérdida que puede sufrir un elemento o conjunto de elementos en riesgo, como resultado de la posible ocurrencia de un evento desastroso, expresada en una escala que va de 0, indicando sin daño, a 1, que representa pérdida total.

**Riesgo Específico (Specific risk - RS):** Se refiere al grado de pérdidas esperadas como consecuencia de un evento particular, considerando la Amenaza y la Vulnerabilidad.

**Elementos Bajo Riesgo (E):** Este concepto se refiere a la población, edificaciones, obras civiles, actividades económicas, servicios públicos o infraestructuras que están expuestas en un área específica.

**Riesgo Total (Total Risk - Rt):** Se define como la suma de pérdidas humanas, heridos, daños a propiedades y efectos sobre la actividad económica derivados de la ocurrencia de un evento desastroso. En términos matemáticos, esto corresponde al producto del Riesgo Específico (RS) y los Elementos Bajo Riesgo (E). Por lo tanto, la evaluación del riesgo puede expresarse mediante la fórmula general:

**Riesgo Total = Elementos Bajo Riesgo x (Amenaza x Vulnerabilidad)**

**Factores Condicionantes:** Se definen como aquellos elementos que generan una situación potencialmente inestable. Entre estos factores se incluyen principalmente la geomorfología, la geología, la geotecnia y la vegetación (Hauser, 1993).

**Agentes Desencadenantes:** Se refiere a un factor externo que provoca una perturbación capaz de iniciar una remoción en masa, ya sea mediante un aumento de esfuerzos o la reducción de la resistencia del material de una ladera (Wieczorek, 1996 en Lara y Sepúlveda, 2008). Los principales agentes desencadenantes incluyen lluvias intensas y sismos, mientras que en un segundo orden se consideran erupciones volcánicas, la intervención humana, la fusión de nieve y la erosión de canales, entre otros.

**Ladera:** Se describe como una masa de tierra que no es uniformemente plana, sino que presenta pendientes o variaciones significativas en altura, cuya formación es el resultado de procesos naturales.

**Talud:** Se refiere a una ladera de origen artificial, creada por la acción directa del ser humano.

**Remoción en Masa:** Se refiere al desplazamiento de grandes volúmenes de material superficial hacia abajo, causado directamente por la fuerza de gravedad, que culmina cuando esta masa alcanza un nuevo punto de reposo.

**Susceptibilidad:** Se entiende como la probabilidad de que ocurra un evento potencialmente desastroso en un lugar específico, o lo que es lo mismo, la componente espacial del peligro, sin considerar el factor tiempo.

## 5.2. REMOCIONES EN MASA

Los procesos de remoción en masa son eventos que implican el transporte de materiales, los cuales se definen como una “movilización lenta o rápida de un volumen específico de suelo, roca o ambos, en diferentes proporciones, provocados por una variedad de factores” (Hauser, 1993). Estos movimientos son generalmente influenciados en gran medida por la gravedad (Cruden, 1991). En la figura 5.1 se ilustran las distintas partes que conforman una remoción en masa, lo cual resulta esencial para su identificación en el campo.

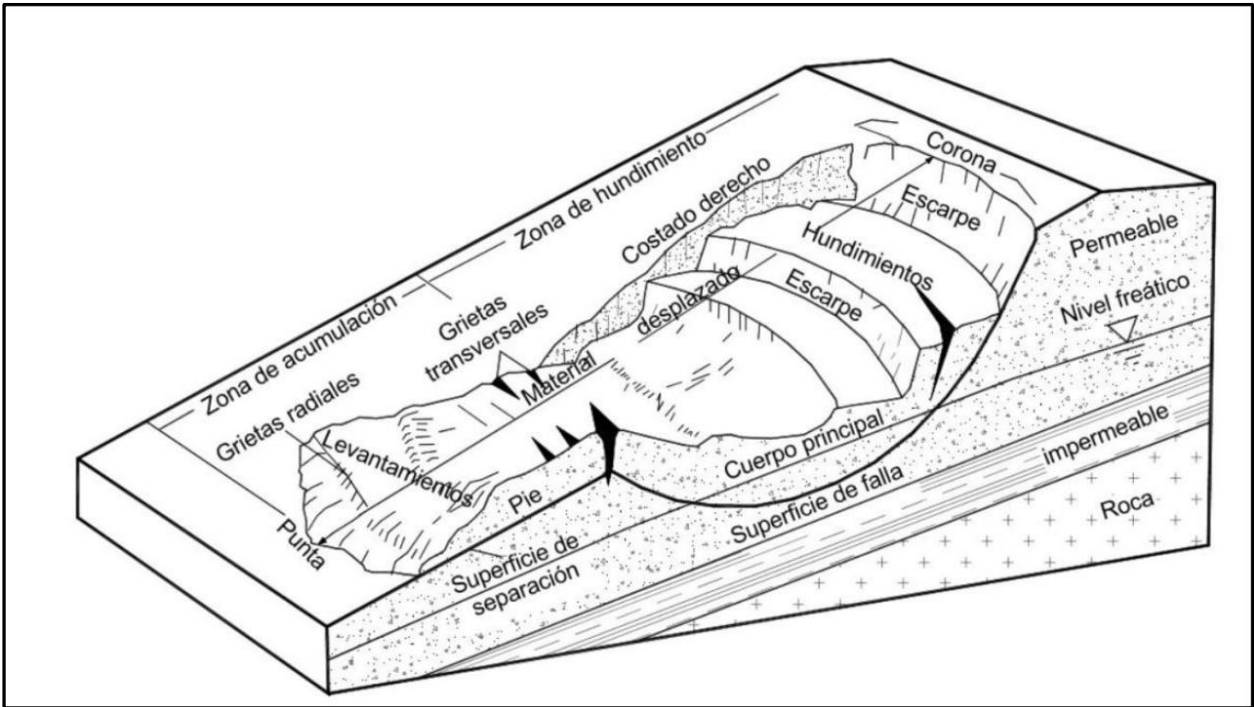


Figura 5.1: Partes de una remoción en masa. Modificado de Lara y Sepúlveda (2008).

### 5.2.1. Tipos de remociones en masa.

Cruden y Varnes (1996) clasifican las remociones en masa en función del tipo de movimiento y del material que se encuentra involucrado (Varnes, 1984). Los tipos de movimiento incluyen caídas (o desprendimientos), volcamiento (también conocido como toppling), deslizamientos, extensiones laterales y flujos. Estos movimientos pueden presentarse de forma aislada o en combinación, sin que esto afecte su clasificación.

- 1) **Caídas:** Se trata de movimientos abruptos de materiales geológicos, como rocas y bloques, que se desprenden de laderas empinadas o acantilados (figura 5.2).

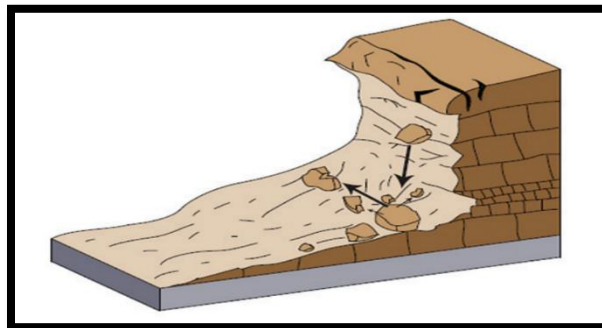
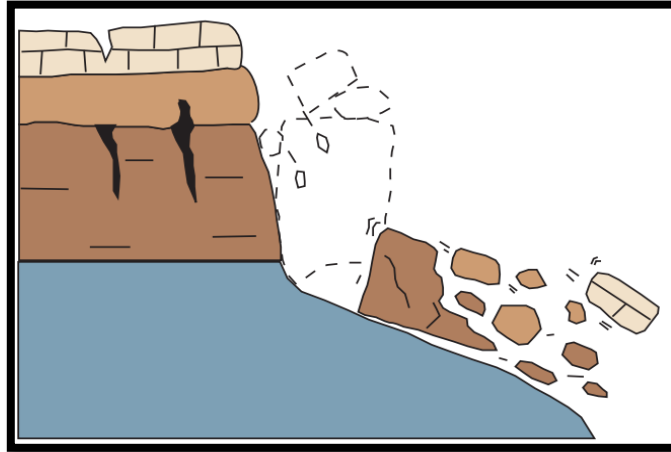


Figura 5.2: Dibujo esquemático de una caída de roca. Modificado de Highland y Bobrowsky (2008)

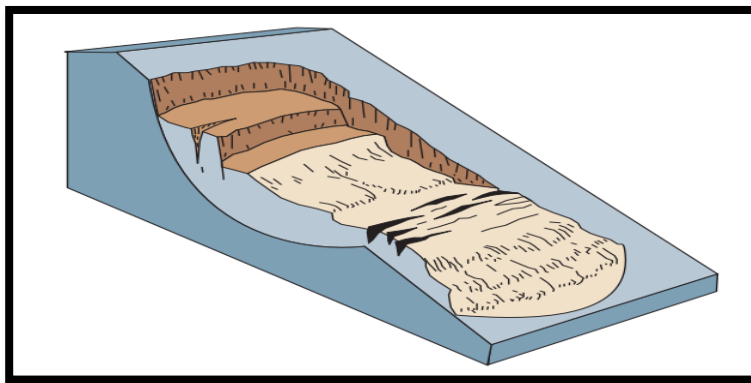
- 2) **Volcamiento (Toppling):** Este tipo de movimiento se caracteriza por la rotación hacia adelante de una o varias unidades sobre un punto o eje bajo el centro de gravedad de la masa. A diferencia de una caída, aquí se genera cizallamiento en la superficie de ruptura, y el movimiento ocurre principalmente debido a la gravedad.



**Figura 5.3: Dibujo esquemático de un volcamiento.**  
Modificado de Highland y Bobrowsky (2008)

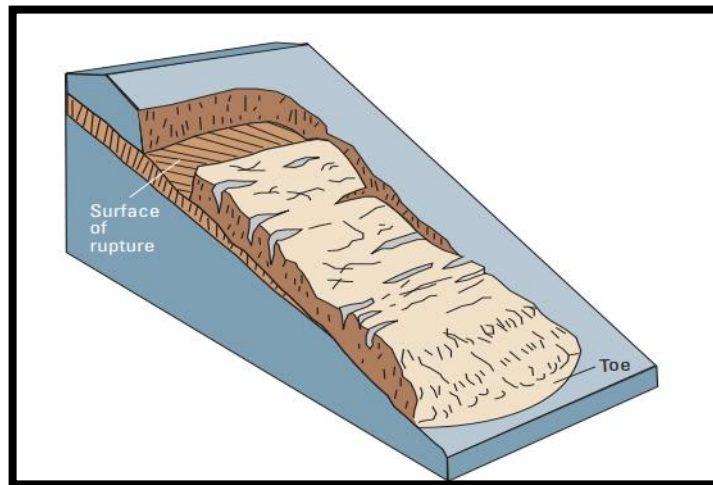
- 3) **Deslizamientos:** Aunque el término "deslizamiento" abarca varios tipos de movimientos de masa, en su uso más específico se refiere al movimiento donde una zona de debilidad distingue el material deslizante del material subyacente, que es más estable. Los dos tipos principales son:

- a) **Deslizamiento rotacional:** Ocurre cuando la superficie de ruptura es curvada cóncavamente hacia arriba, con un movimiento giratorio alrededor de un eje paralelo al suelo.



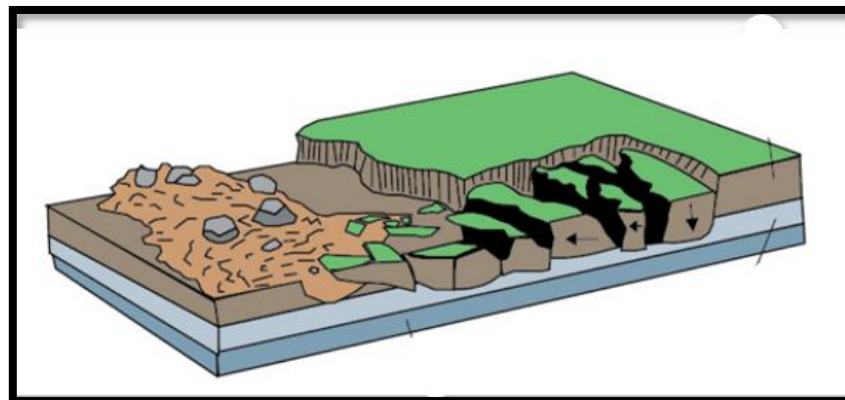
**Figura 5.4: Dibujo esquemático de un deslizamiento rotacional.** Modificado de Highland y Bobrowsky (2008)

- b) **Deslizamiento traslacional:** En este caso, la masa de tierra se desplaza sobre una superficie relativamente plana, sin mucha rotación. Una variante es el deslizamiento de bloque, en el cual una o pocas unidades se desplazan cuesta abajo como una masa coherente.



**Figura 5.5: Dibujo esquemático de un deslizamiento traslacional.** Modificado de Highland y Bobrowsky (2008)

- 4) **Extensiones laterales:** Estas suelen ocurrir en terrenos planos o de pendiente suave. Se caracterizan por un movimiento de extensión acompañado de fracturas de tensión o cizallamiento, a menudo causado por la licuefacción de sedimentos sueltos y saturados, como arenas o limos. Aunque generalmente es provocado por movimientos rápidos del suelo, como los terremotos, también puede ser inducido artificialmente. El material sólido que reposa sobre capas licuadas puede fracturarse, rotar o desplazarse.



**Figura 5.6: Dibujo esquemático de una extensión lateral.** Modificado de Highland y Bobrowsky (2008)

- 5) **Flujos:** Estos movimientos varían en velocidad, desde extremadamente rápidos hasta muy lentos. Existen cinco categorías principales: a) Flujo de detritos: Se trata de un movimiento rápido de una mezcla de suelo suelto, roca, material orgánico, aire y agua, que se desplaza como lodo cuesta abajo. Comúnmente causado por fuertes lluvias o deshielo rápido, el flujo de detritos incluye hasta un 50% de material fino. b) Avalancha de detritos: Una forma de flujo de detritos con velocidades que van de rápidas a muy rápidas. c) Flujo de tierra: Tiene una forma característica de "reloj de arena", en donde el material se licua y agota, creando una depresión en la cabeza. Generalmente ocurre en materiales finos o rocas arcillosas en condiciones de saturación. d) Flujo de lodo: Consiste en un movimiento rápido de tierra con suficiente humedad, donde al menos el 50% del material es de tamaño de arena, limo y arcilla.

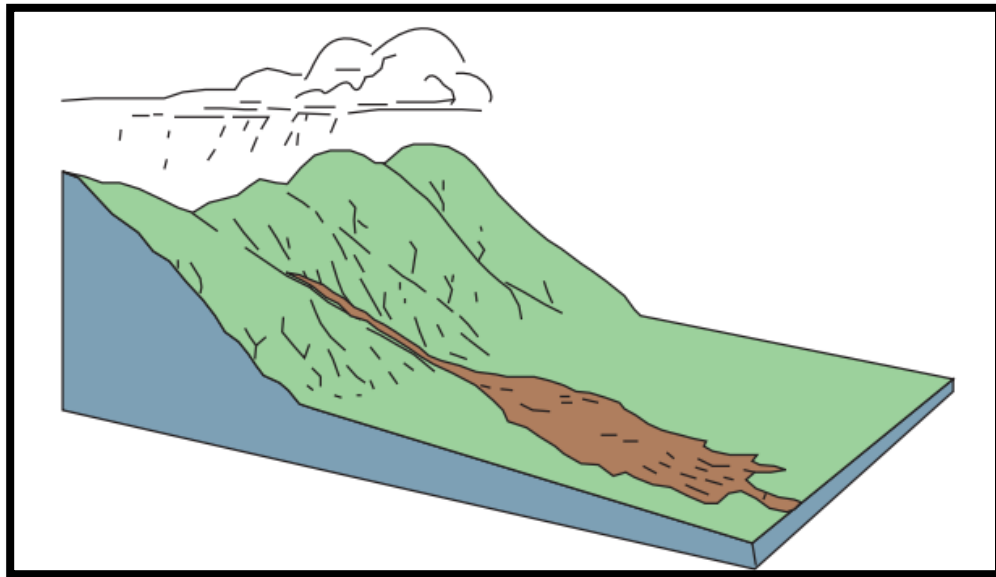


Figura 5.7: Dibujo esquemático de un flujo. Modificado de Highland y Bobrowsky (2008)

## 5.2.2. Factores condicionantes y desencadenantes.

### 5.2.2.1. Factores condicionantes.

Los factores condicionantes se refieren a las características geológicas, geomorfológicas y otras que favorecen condiciones de inestabilidad, donde es posible que se produzcan deslizamientos (Hauser, 1993). Entre los principales factores incluidos en este grupo están la geomorfología,

geología, geotecnia, hidrología e hidrogeología, vegetación, clima y, finalmente, la intervención humana.

Cada proceso de remoción en masa tiene un origen y comportamiento únicos, por lo que los factores condicionantes son determinantes para evaluar la susceptibilidad de que ocurra un evento específico en una zona particular.

- 1) **Geología y Geotecnia:** Esta característica del terreno influye en mayor o menor medida en la ocurrencia de eventos de remoción en masa, ya que determina el material disponible para su formación. Los depósitos o materiales tienen ciertas propiedades que se estudian, como la densidad, plasticidad, humedad y permeabilidad, así como la litología de las rocas, sus estructuras, alteraciones y el grado de meteorización. Las características geológicas de un área influyen considerablemente en su capacidad para ser removidas o movilizadas. Por ejemplo, los depósitos volcanoclásticas, glaciales, aluviales, coluviales y de flujo de detritos antiguos son permeables, lo que permite que el agua se infiltre con facilidad, produciendo una rápida saturación que favorece los deslizamientos.
  
- 2) **Geomorfología:** Los rasgos geomorfológicos que más afectan los eventos de remoción en masa incluyen la topografía, las pendientes de las laderas, los cambios bruscos en los ángulos de estas pendientes, así como su extensión, altura y orientación. Estos elementos impactan en la velocidad, energía y volumen de las posibles remociones. Cualquier alteración en el terreno puede transformar una ladera estable en inestable, provocando procesos de remoción en masa (Popescu, 2002). El factor geomorfológico más relevante es el de las laderas, ya que aquellas con pendientes fuertes, altas y abruptas favorecen las caídas, flujos y deslizamientos al crear inestabilidad en los materiales presentes. Cuanto mayor sea el ángulo de las pendientes (más de 25° según Hauser (1993) y más de 15° según Sauret (1987)), mayor será la capacidad de transporte y energía de los flujos. Además, la orientación de la ladera es fundamental porque influye en su exposición al sol, afectando la cantidad de vegetación, el grado de humedad del suelo y la velocidad de los procesos de meteorización.

- 3) **Hidrología e Hidrogeología:** Este factor es crucial, ya que considera la disponibilidad y presencia de agua en suelos y rocas. La red de drenaje, la ubicación y variaciones del nivel freático, los caudales y el coeficiente de infiltración son elementos que afectan la generación de remociones en masa. El agua tiene un impacto significativo en la estabilidad de las laderas, ya que reduce la resistencia de la roca, incrementa la presión de poros y aumenta los esfuerzos de corte al añadir peso al terreno. Además, el agua actúa como un agente de transporte para sedimentos y rocas (Lara y Sepúlveda, 2008).
  
- 4) **Clima y Vegetación:** Aunque el clima es un factor determinante en la generación de remociones en masa, la vegetación se considera más bien un factor secundario, ya que su presencia no garantiza una estabilidad ni una reducción notable en la erosión del suelo. Los principales factores climáticos que afectan la estabilidad de las laderas incluyen las precipitaciones, temperaturas, vientos y radiación solar. En Chile, el clima lluvioso en las regiones al sur del río Biobío, combinado con las bajas temperaturas en áreas montañosas, crea condiciones de disponibilidad de agua o nieve, generando inestabilidad en las laderas.
  
- 5) **Actividad Antrópica:** Este factor es significativo para la estabilidad de las laderas, ya que incrementa la susceptibilidad de una zona a eventos de remoción en masa. Actividades comunes en la industria, como excavaciones, rellenos, obras civiles, urbanización, cambios en el uso del suelo y extracción de áridos, contribuyen a la desestabilización de laderas al reducir artificialmente la resistencia del material.

En la figura 5.8 se muestra cómo cada uno de estos factores se relaciona con los tipos de remociones en masa descritos anteriormente.

Factores Condicionantes \ Tipo de remoción en masa	Caídas	Deslizamientos	Toppling	Flujos	Extensiones Laterales
Geología y Geotecnia	X	X	X	X	X
Geomorfología	X	X	X	X	X
Hidrología e Hidrogeología	X	X	X	X	X
Vegetación y Clima		X		X	X
Actividad Antrópica	X	X	X	X	

**Figura 5.8:** relación entre factores condicionantes y el tipo de remoción. Lara y Sepúlveda (2008)

#### 5.2.2.2. Agentes desencadenantes.

Los agentes desencadenantes se refieren a factores externos que provocan remociones en masa al causar un aumento rápido de los esfuerzos o una disminución de la resistencia del material en una ladera. Estos agentes ejercen su efecto sobre la ladera en un periodo breve.

Las precipitaciones intensas y los sismos son los agentes desencadenantes más habituales de las remociones en masa, pero considerando que no se aprecian evidencias de actividad tectónica en el área de estudio se decide ahondar solamente en el primero, ya que todo indica que es este el factor más crítico si es que no el único con un rol relevante.

Como se mencionó, las precipitaciones son los principales factores desencadenantes de remociones en masa, y su impacto está relacionado con la intensidad, duración y distribución de las lluvias (González *et al.* 2002). Las precipitaciones incrementan el grado de saturación de los materiales, tanto en el suelo como en las fracturas; por ello, las lluvias intensas y de corta duración generan condiciones propicias para remociones más superficiales, mientras que las lluvias prolongadas, sin importar su intensidad, están asociadas a remociones en masa más profundas. Además, las precipitaciones intensas incrementan la escorrentía superficial, lo que provoca la remoción de material en laderas con suelo suelto, reduciendo así su estabilidad.

## **6. TRABAJO EN TERRENO.**

### **6.1. OBSERVACIONES GENERALES**

En el área de trabajo se esperaría encontrar afloramientos de la Formación Cola de Zorro según bibliografía, sin embargo, a lo largo de todo el canal no se observan afloramientos de roca, en su lugar solo se puede observar cobertura cuaternaria.

En cuanto a la cobertura vegetal, se puede deducir que influye en cierta medida a la estabilidad del material, esto pues las zonas de cobertura vegetal más densa y arbustiva, con raíces más delgadas y poco penetrativas muestran mayor estabilidad en comparación con aquellas áreas donde predominan árboles de mayor tamaño, con raíces más gruesas pero que al no alcanzar un material suficientemente resistente son arrastrados cuesta abajo y se vuelven parte del material removido, aportando al problema en lugar de mitigarlo.

Respecto al contenido de agua en los sedimentos, pese a que las observaciones en terreno se realizaron en periodos no particularmente lluviosos se pudo apreciar que la mayor parte del suelo estaba saturado en agua, en algunos lugares puntuales incluso se forman pequeños canales de drenaje superficiales que escurren hacia el canal y los bordes de este acumulan agua al punto de que el suelo no es capaz de absorberla y esta se estanca en la superficie. Si bien no hay datos específicos sobre precipitaciones para la zona de estudio (al menos no disponibles públicamente) la misma municipalidad de Antuco reporta precipitaciones de en torno a los 200 mm mensuales distribuidos uniformemente a lo largo del año, incluyendo tanto lluvia como granizo y nieve.

### **6.2. DESCRIPCIÓN DE SUELO**

El suelo en la zona de estudio es consistente con depósitos glacio-fluviales cuyo material primigenio sería de origen volcánico, el color de estos depósitos es marrón oscuro a grisáceo con variaciones menores, pudiendo observarse algunas bandas rojizas, el tamaño de partículas es predominantemente arena gruesa, en torno a 2 mm de diámetro con fragmentos mayores alcanzando hasta los 30 cm en algunos lugares, estos bloques sin embargo son poco comunes y más bien una rareza dentro del material en general, también hay un importante contenido de

partículas tamaño arcilla, que le otorgan cierta cohesión al suelo, pero a la vez lo hacen poco permeable.

En cuanto a la mineralogía, por lo reducido del tamaño de partículas es difícil establecer una composición clara, pero se logra ver algunos cristales de en torno a 1mm de cuarzo que ha resistido a la meteorización, además de algunos cristales (en mucho menor cantidad) de plagioclasa, pero lo que predomina son minerales oscuros indiferenciables, consistentes con lavas basálticas que son el producto característico del volcanismo de la zona.

En cuanto a la geometría de los granos, en aquellos de suficiente tamaño para poder ser observados, estos son predominantemente subangulares a subredondeados y bastante uniformes en cuanto a esfericidad, predominando formas más bien esferoidales a sub prismoidales, lo que indica poco transporte del material atribuible principalmente a acción hidráulica.

No se observan grandes variaciones en la composición ni granulométrica ni mineralógica del suelo a lo largo del canal, sin embargo, si se pueden apreciar pequeñas variaciones en el desarrollo del suelo, con sectores donde las raíces vegetales han logrado penetrar a mayor profundidad y más densamente mientras que en otros apenas se pueden ver raíces arraigadas al suelo, esto coincide parcialmente con el contenido de agua observable, siendo las áreas con menor contenido de agua las más vegetadas.

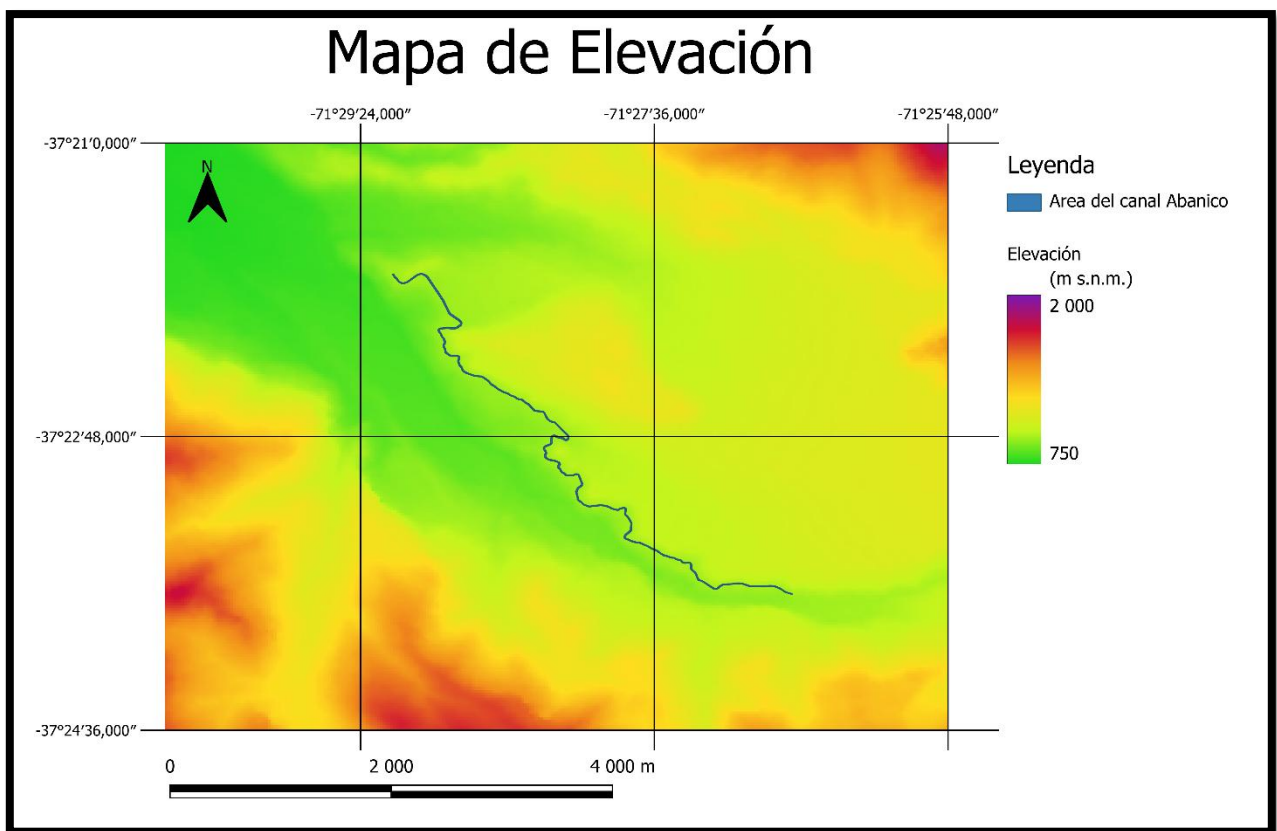
## 7. ANALISIS DE SUCEPTIBILIDAD

### 7.1. ANÁLISIS DE RELIEVE.

#### 7.1.1. Elevación.

El análisis de la altitud del terreno es de gran relevancia, pues una gran diferencia de elevación entre puntos muy cercanos constituye un ambiente propicio para la generación de remociones en masa.

Utilizando el software *QGIS* y con ayuda de un modelo de elevación digital, se ha creado un mapa ilustrativo de las altitudes en la zona de estudio (Figura 7.1)

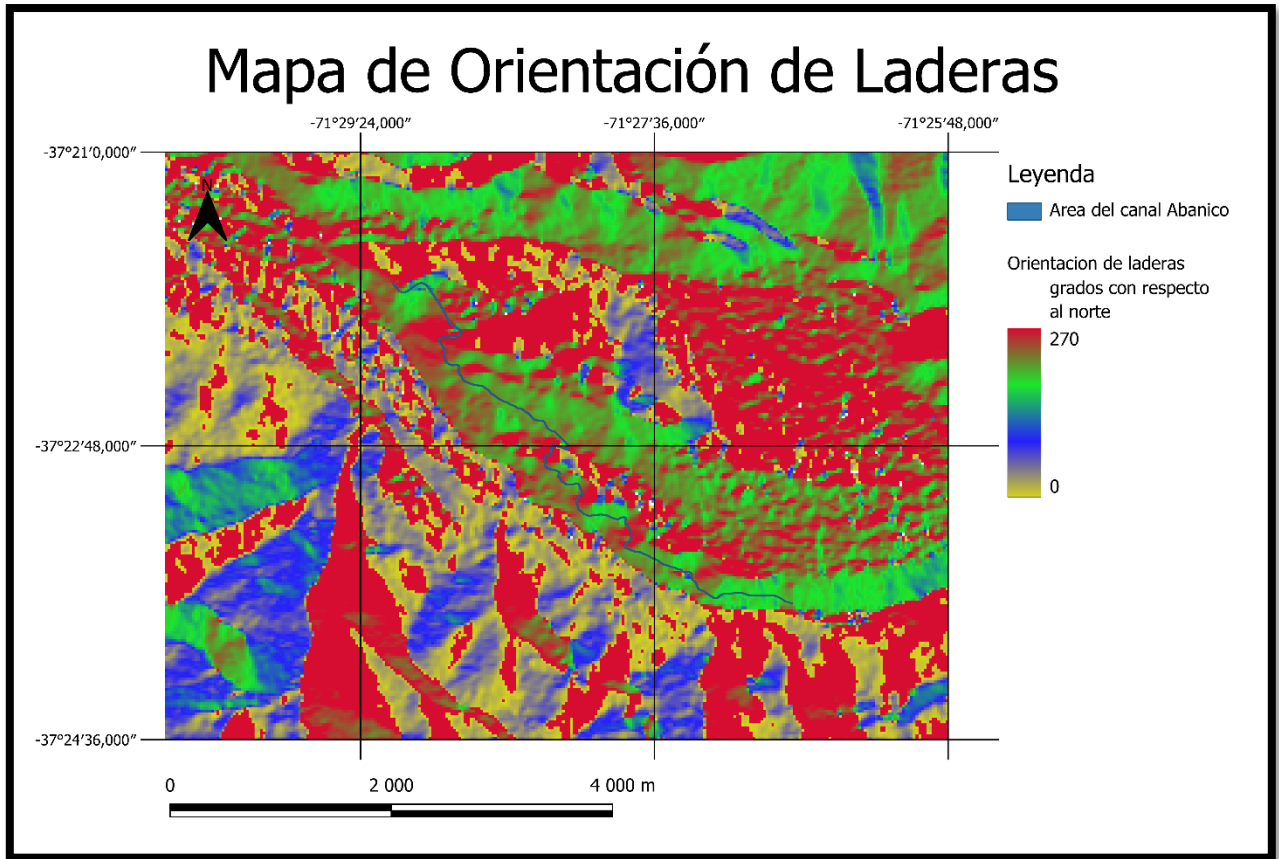


**Figura 7.1: Mapa de elevación del terreno**, en azul se demarca el área que ocupa el canal en si mismo, en verde las zonas más deprimidas y en rojo las más elevadas.

Se puede notar que en general el valle del río Laja es una zona más bien llana, siendo los extremos del área mapeada los más elevados y el cauce mismo del río el área más deprimida, encontrándose el canal (resaltado en azul) en un área de elevación media, dentro del valle fluvial moldeado por el río.

#### 7.1.2. Orientación de laderas.

El análisis de la orientación de laderas o pendientes es de relevancia ya que gracias a él se pueden inferir zonas más expuestas a factores climáticos como el viento, las precipitaciones o la acumulación de nieve. Mediante *QGIS* se ha creado un mapa simplificado mostrando la orientación dominante según puntos cardinales (figura 7.2), con esto se puede inferir que laderas están más expuestas a radiación solar, viento o lluvias (por lo general el lado norte) y cuáles serían más propensas a la acumulación y retención de nieve (lado sur).



**Figura 7.2: Mapa de orientación de laderas**, en amarillo aquellas orientadas al norte, en azul las orientadas al este, en verde al sur y en rojo al oeste.

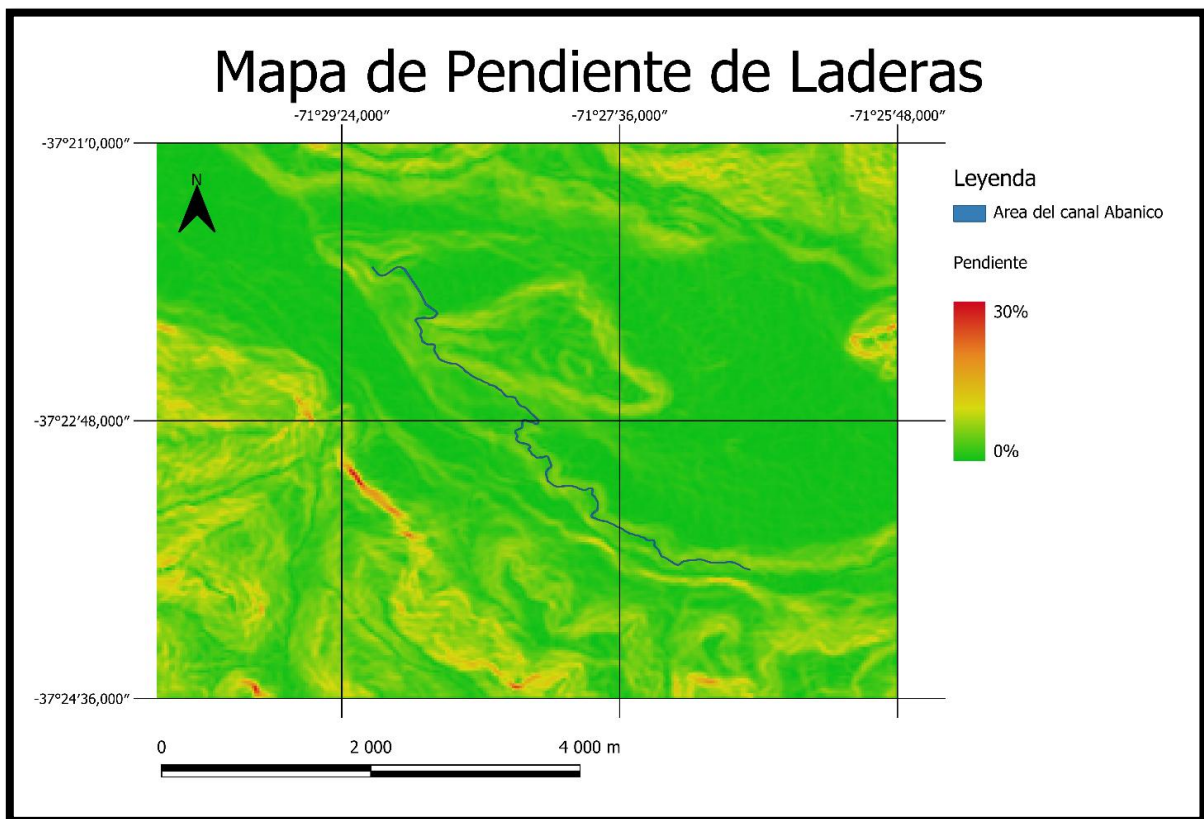
Como se logra notar, la ladera que aloja al canal está orientada predominantemente hacia el suroeste, lo que la deja poco expuesta a la acción del viento o la radiación solar en comparación con la ladera opuesta, pero favorece la acumulación de nieve y retención de humedad en el suelo.

### 7.1.3. Pendiente de laderas.

Otra característica relevante de analizar es el ángulo de pendiente de las laderas, ya que este factor contribuye en gran medida a la generación de remociones en masa o deslizamientos de material, especialmente durante sismos.

Según Hauser (1993) pendientes superiores a  $25^\circ$  en las cabeceras de las cuencas hidrográficas son propensas a la generación de flujos o aluviones, aunque no descarta que puedan ocurrir en pendientes menores, cercanas a los  $15^\circ$ .

Por otra parte, Keefer (1984) considera que frente a sismos de intensidades superiores a IV (escala de Mercalli), sumado a taludes con ángulos de inclinación mayores o iguales a  $15^\circ$  son susceptibles de generar deslizamientos de suelo de tipo traslacional, por otra parte, ángulos mayores o iguales a  $10^\circ$  son suficientemente inclinados para propiciar deslizamientos rotacionales.



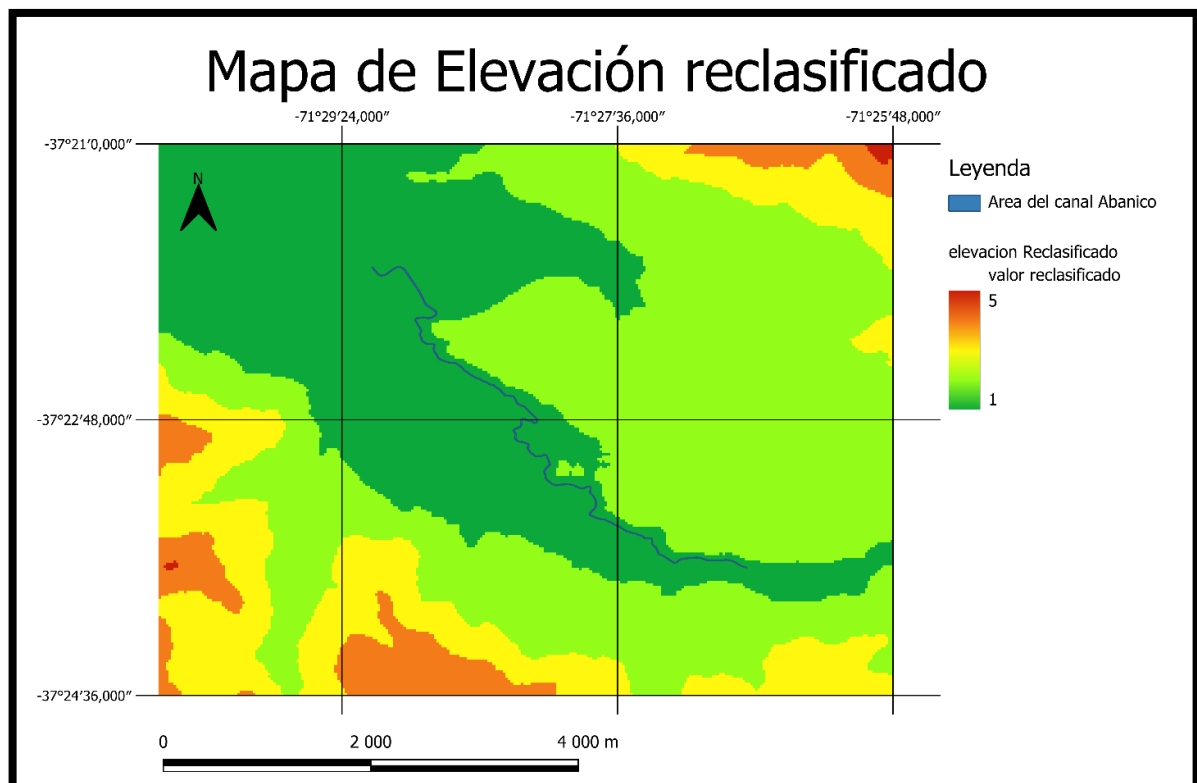
**Figura 7.3: Mapa de pendiente de laderas**, en verde aquellas con menor pendiente (incluido llanuras) y en rojo aquellas con hasta un 30% de inclinación.

Para este estudio, mediante *QGIS* se generó un mapa de pendiente de laderas (figura 7.3), clasificándolas según el porcentaje de inclinación, en el cual se puede observar una marcada predominancia en el área mapeada de zonas de media a elevada pendiente, incluso cercana al 20% e incluso 30% de inclinación, particularmente alrededor del canal la pendiente es de en torno al 20%, con pequeñas variaciones locales, lo que equivale a una pendiente de al menos  $12^\circ$  en la mayor parte de la extensión del canal.

## 7.2. MAPAS RECLASIFICADOS

### 7.3.1. Mapa de elevación.

Este mapa (figura 7.4) de elevación reclasifica la elevación del terreno con respecto al nivel del mar, pasando de una métrica en metros a un factor entre 1 y 5, tomando intervalos de crecimiento regulares de 250 metros cada uno, comenzando desde los 750 m s.n.m. hasta los 2.000 m s.n.m.

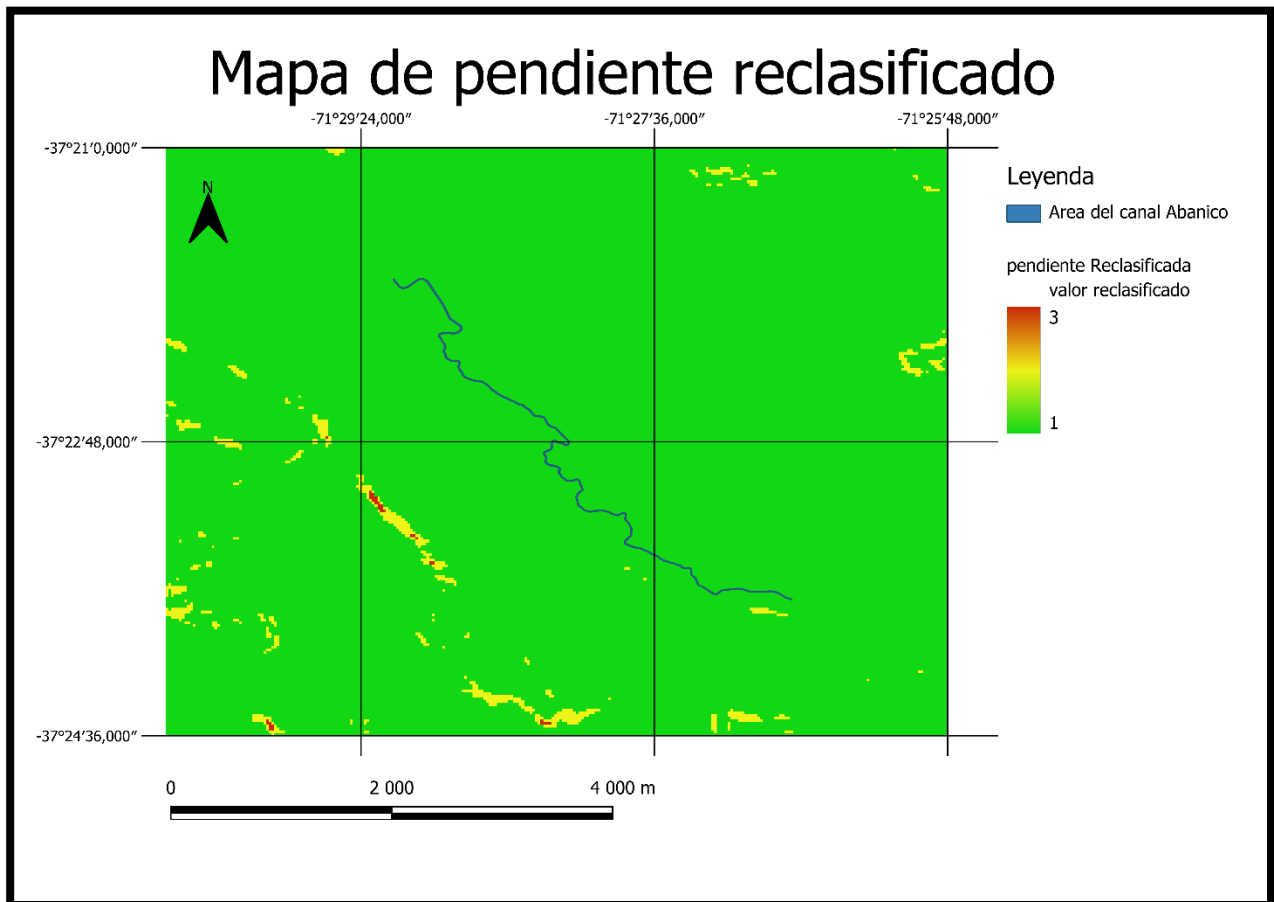


**Figura 7.4: Mapa de elevación reclasificado**, asignando un valor entre 1 y 5, donde 1 es una altitud entre 750 y 1000 metros, 2 es entre 1000 y 1250, 3 es entre 1250 y 1500, 4 es entre 1500 y 1750 y 5 es entre 1750 y 2000 m s.n.m.

Como se puede apreciar el área del canal abanico se encuentra dentro del primer tramo, es decir que la elevación está entre los 750 y 1.000 metros sobre el nivel del mar para toda la extensión del canal.

### 7.2.2. Mapa de pendiente de laderas.

Este mapa (figura 7.5) reclasifica la pendiente de laderas de un valor porcentual de inclinación a un factor entre 1 y 3, donde cada intervalo corresponde a un aumento del 10% de la pendiente, comenzando en 0% y llegando hasta el 30%.



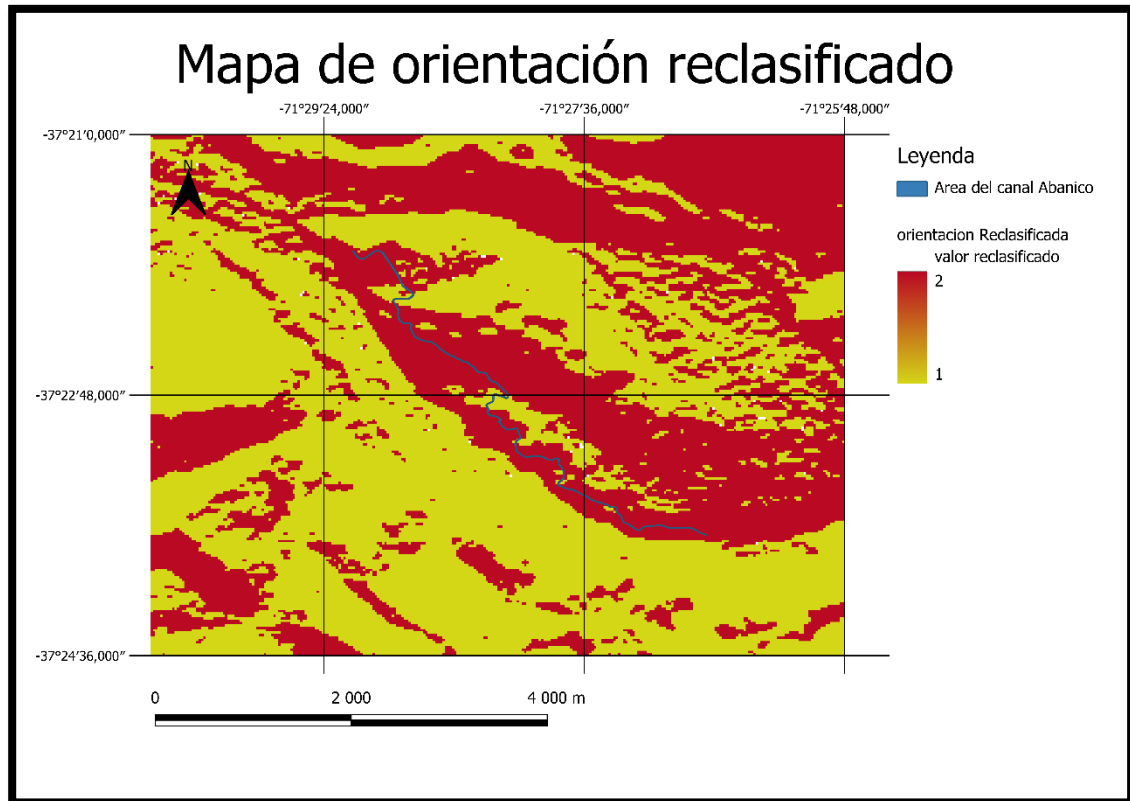
**Figura 7.5: Mapa de pendiente reclasificado**, asignando un valor entre 1 y 3, donde una pendiente entre 1 es una pendiente entre 0% y 10%, 2 es una pendiente entre 10% y 20% y 3 es una pendiente entre 20% y 30%.

Como se aprecia en la figura, la pendiente del terreno es relativamente baja, encontrándose la totalidad del área del canal y sus inmediaciones dentro del área de factor 1 a 2, por lo que la pendiente en cercanías del canal no supera el 20%.

### 7.2.3. Mapa de orientación de laderas.

El mapa de orientación de laderas reclasificado (figura 7.6) es una simplificación del mapa de orientación previo, en este se toman solo dos orientaciones preferenciales de laderas, noreste (con valor de factor 1) y suroeste (con valor de factor 2) para enfatizar que esta última orientación favorece la acumulación de nieve y agua.

En el mapa se puede observar que la orientación 2 (suroeste) predomina a lo largo de la mayor parte del canal, excepto en ciertos espacios puntuales, donde el cambio de orientación de la ladera



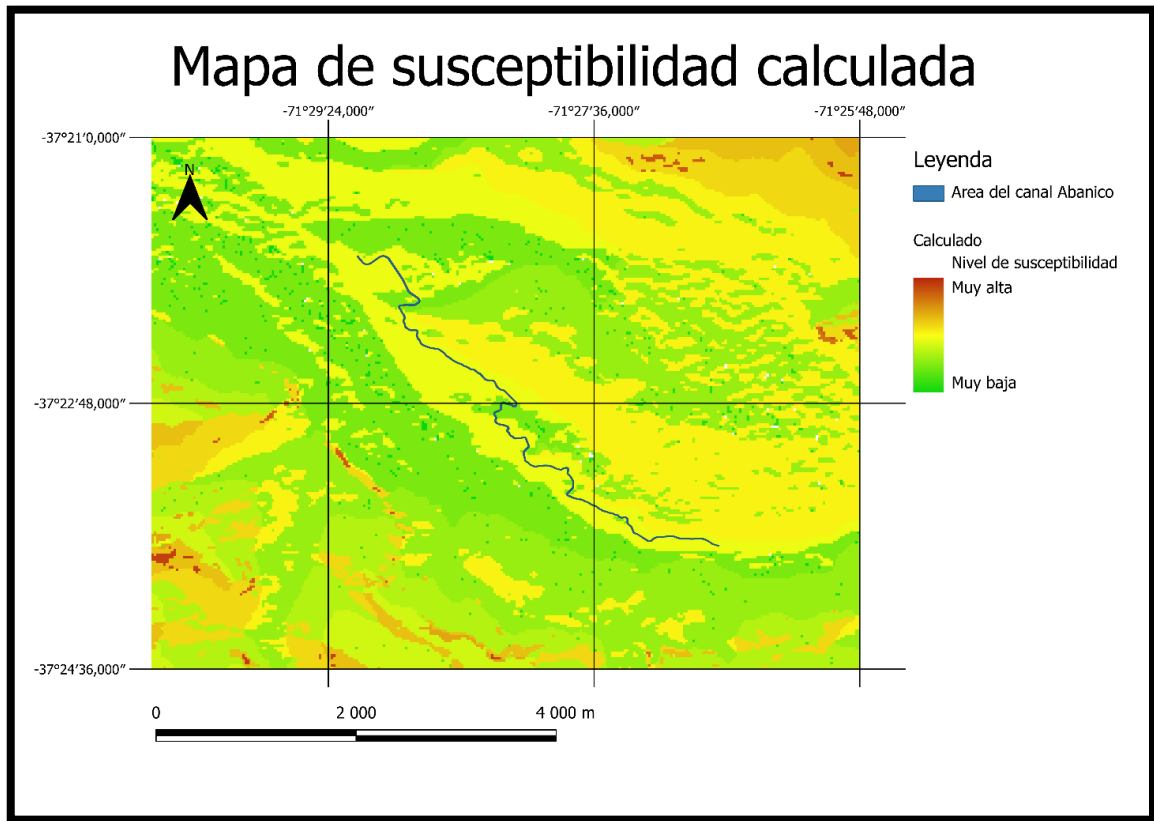
**Figura 7.6: Mapa de orientación de laderas reclasificado**, asignando un valor entre 1 y 2, donde las pendientes orientadas al norte o al este corresponden a 1 y las orientadas al sur o al oeste corresponden a 2.

coincide con cambios en la orientación del canal mismo.

### 7.3. MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD CALCULADO

Este mapa (figura 7.7) se generó a partir de los tres anteriores, mediante el uso de las herramientas de generación de *raster* de *QGIS* donde cada uno de los mapas anteriores contribuye una fracción de su información a este mapa total, el porcentaje de influencia de cada uno es: pendiente 50%, orientación 40% y elevación 10%, estos porcentajes se eligieron en base a la influencia que se considera que cada factor tendría sobre el riesgo total, siendo muy predominante la pendiente, por controlar el efecto de la gravedad sobre los materiales, en menor medida tenemos la orientación de

las pendientes, que como se menciona previamente influye en la tasa de acumulación de nieve y de derretimiento de la misma y por último la elevación, la cual considerando que la zona de estudio se encuentra casi en una misma cota es poco relevante.



**Figura 7.7: Mapa de susceptibilidad calculada**, donde el mapa de pendiente de laderas contribuye un 50%, el de orientación de laderas un 40% y el de elevación un 10%.

Se puede observar que en general las inmediaciones del canal son una zona de baja a media susceptibilidad a nivel regional, al menos considerando los factores de relieve expuestos anteriormente, esto no quiere decir que estos factores sean irrelevantes, ya que influyen indirectamente en la retención de agua del suelo, que como veremos es crucial en este caso particular.

#### 7.4. Redes de drenaje.

Si bien por la escala del mapa las redes de drenaje más allá del curso principal de agua (el río Iaja) no pudieron mapearse, si se observa localmente pequeños flujos de agua por la ladera adyacente al canal, en especial en las zonas afectadas por remociones en masa, lo que demuestra la gran

importancia que tiene la saturación de agua en el desencadenamiento de los desprendimientos de material. También se pueden apreciar indicios de flujos inactivos o estacionales en otros sectores cercanos al canal, por lo que la escorrentía superficial y los drenajes intermitentes son la tónica en el sector.

## 7.5. FACTORES ADICIONALES NO MAPEABLES

Los factores que más contribuyen a los desprendimientos de material en el área de estudio parecen ser la vegetación y la saturación de agua, desgraciadamente estos factores no se pueden llevar a un mapa, dado la resolución que debería tener éste y la gran variabilidad que presentan dichos factores, sin embargo, si es posible describirlos en términos generales.

La vegetación predominante en la zona de estudio son coníferas, pinos de una especie no identificada, posiblemente plantados con el fin de darle estabilidad al suelo como se hace en otros lugares dentro de la región del Biobío y en general en el sur de Chile, los cuales sin embargo demuestran ser poco efectivos en esta tarea, pues por su gran tamaño y masa, además de raíces poco ramificadas no logran darle sostén al suelo, sino que más bien se deslizan ladera abajo junto con el suelo (figura 7.8). Por el contrario, las áreas donde la vegetación es más bien arbustiva o una combinación de pino con arbustos y otras plantas menores parecen ser más estables y darle mejor sustento al suelo.



**Figura 7.8:** Remoción al costado del canal, con presencia de vegetación desplazada junto con el suelo.

En cuanto al agua, este parece ser el factor más crítico en el desencadenamiento de remociones en masa en el área de trabajo, resulta evidente que los sectores más secos, o mejor dicho menos húmedos han sufrido menos desprendimientos o deslizamientos de material, mientras que aquellos que ya se han visto afectados por estos fenómenos presentan gran saturación de agua e incluso escorrentía superficial en algunos casos (figura 7.9), por lo que serían susceptibles de nuevas remociones a futuro. Además de reducir las fuerzas de cohesión entre las partículas el agua al llenar los espacios entre los granos aumenta la densidad y por ende la masa total del suelo, haciéndolo más propenso a sufrir los efectos de la gravedad.



Figura 7. 9: remoción con presencia de agua corriente.

## 7.6. INVENTARIO DE REMOCIONES EN MASA

A continuación, se presentan en una imagen satelital (figura 7.10) los puntos de interés identificados como remociones o desprendimientos de material y visitados *in situ* para su observación en detalle.

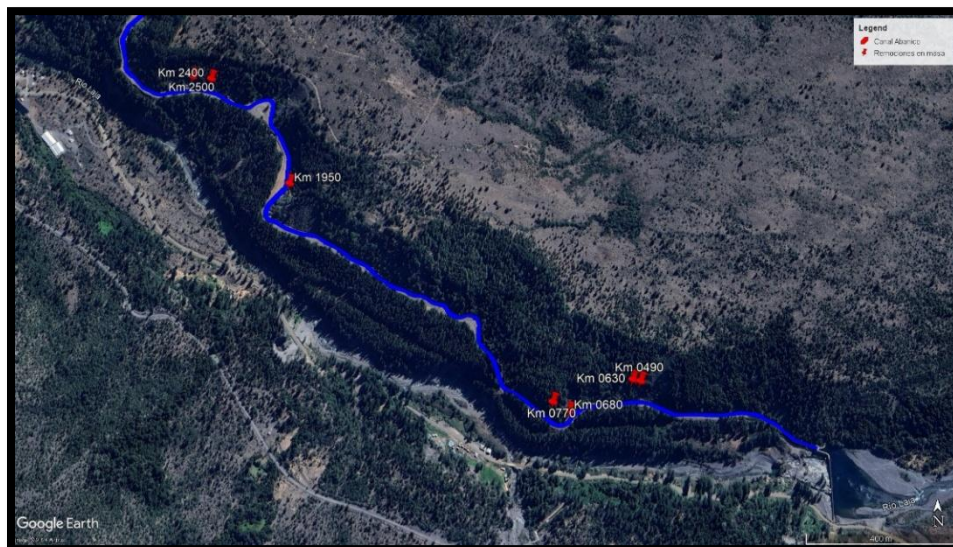


Figura 7.10: vista satelital del área de estudio, resaltando el área del canal y los puntos de interés

Los puntos antes mencionados se detallan a continuación, identificados según su distancia con respecto al inicio del canal objeto del estudio:

Km 0490 y Km 0630:

Remociones de material superficial, no se aprecia roca sólida, el desplazamiento del suelo remueve consigo materia vegetal, la textura general del suelo es más bien granular, poco arcillosa de color café rojizo, aún se puede apreciar cobertura parcial de nieve sin escorrentía superficial o acumulación de agua líquida evidente.

Km 0680 y Km 0770:

Muy similar al caso anterior, aunque no se pudieron muestrear por problemas de acceso, se infiere un ligero cambio en la mineralogía por presentar clastos de tamaño mayor y una coloración más rojiza, se puede ver que el movimiento del suelo arrastró consigo vegetación de gran tamaño, aunque no se ve agua corriente se mantiene la cobertura nival parcial de la zona (Figura 7.11).



**Figura 7.11: remoción en masa con contenido vegetal y cobertura nival**

Km 1950:

Remoción de suelo con presencia de agua corriente en canales que coincide aproximadamente con el eje central de la remoción, menor contenido de vegetación en comparación a los demás puntos, se infiere un cambio mineralógico por el cambio de tonalidad del suelo hacia un color más oscuro, con mayor contenido de arcilla, lo que lo hace más bien plástico (figura 7.12) y evita la infiltración de agua, lo que produce acumulación de esta entre la ladera y el muro del canal.



**Figura 7.12:** suelo con alto contenido de arcilla, evidenciado por la capacidad de sostener el martillo geológico y por su coloración.

Km 2400 y Km 2500:

Remociones de mayor extensión tanto lateral como verticalmente, muestran una ligera concavidad, lo que indicaría un deslizamiento rotacional aunque no aflora roca sólida, el suelo tiene un contenido de arcilla mucho menor y se aprecian múltiples flujos de agua constantes, aunque también presenta vegetación esta parece moverse en bloques junto con el suelo, sin desprendimiento de raíces, además se observa evidencia de medidas de contención como muros y canales de drenaje removidos junto con el material del suelo (figura 7.13).



**Figura 7.13: Remoción con evidencia de medidas de mitigación.**

## 8. CONCLUSIONES

Luego de haber terminado el trabajo tanto de terreno como de gabinete, haber recopilado e interpretado la información, se puede concluir lo siguiente:

Si bien el canal se encuentra en una zona sin evidencia de actividad tectónica o presencia de estructuras geológicas el área de construcción del canal no es ideal para la construcción, tanto por encontrarse en una pendiente por sobre el valle dominante (el del río Laja) como por la composición del suelo.

El factor detonante más crítico serían las precipitaciones, ya que como se ha observado el agua es crucial para el debilitamiento y el aumento de masa del material adyacente al canal, no solo es importante la lluvia, la nieve se acumula fácilmente en este sector y si bien se infiltra más lentamente en el suelo su acumulación sostenida representa una carga de peso adicional.

Aunque los deslizamientos de suelo o de suelo y roca que son los observados en el área de estudio son menos destructivos que los desprendimientos de roca y relativamente más lentos que los flujos.

Por último, las zonas más propensas de sufrir nuevas remociones en masa son aquellas que ya se han visto afectadas por estos fenómenos y sus proximidades, ya que el agua es el factor dominante en este caso y todo indica que las áreas afectadas son aquellas con presencia de corrientes de agua aunque sean pequeñas y con una cobertura vegetal pobre o dominada por grandes árboles, mientras que los sectores de menor inclinación, con vegetación más bien arbustiva y densa y con poca evidencia de agua corriente parecen no verse afectados, se puede deducir entonces que los factores condicionantes de remociones en masa en el sector son: vegetación y clima, hidrología e hidrogeología y la actividad antrópica, lo que es consistente con deslizamientos o flujos, que corresponden al tipo de remociones observados.

## 9. RECOMENDACIONES

Considerando lo expuesto en el presente estudio, se pueden hacer las siguientes recomendaciones, para prevenir en la medida de lo posible futuras remociones y mitigar al menos parcialmente sus efectos.:

Mantener monitoreo permanente y revisar periódicamente el estado de la ladera adyacente al canal, en busca de cambios como movimiento del suelo y la vegetación que pudieran dar indicios de un movimiento lento a la espera de un detonante, se recomienda una vigilancia aérea (mediante drones) para complementar las observaciones hechas en persona, además de ofrecer un panorama más completo y alcanzando mayor altura que lo observable por una persona a pie.

Previo a los meses de mayores precipitaciones se recomienda hacer una revisión lo más exhaustiva posible del estado de la ladera y a ser posible implementar medidas de mitigación al menos temporales, como muros de contención o sistemas de canales y desagües que ayuden a drenar o al menos encausar el agua e intentar llevarla de la forma más eficiente posible al canal, evitando que cargue consigo material rocoso o sedimento.

Una medida de mitigación que parece ser efectiva además de amigable con el ambiente es la estabilización biotécnica, es decir plantar arbustos o plantas con gran capacidad de enraizamiento para que la red de raíces proporcione un sustento adicional al suelo, para este propósito se debería evitar el uso de árboles ya que se ha observado que pueden llegar a incrementar el problema en lugar de mitigarlo.

Por último, aunque seguramente más costoso e invasivo se podría intentar impermeabilizar ciertas zonas de la ladera mediante hormigón proyectado u otros métodos, para reducir la infiltración de agua al suelo y redirigir el agua de las precipitaciones al canal principal, esto sin embargo tendría un impacto ecológico y estético importante.

Otra medida de mitigación que podría resultar efectiva sería el uso combinado de un sistema de drenaje hacia el canal como zanjas de drenaje para darle un curso preferente al agua o también drenes californianos para evitar la saturación interna del material con agua, en conjunto con gaviones para ayudar a contener el material sólido, incluido sedimento y materia vegetal, estas medidas serían especialmente efectivas en sectores de saturación hídrica más constante y con menor pendiente.

## REFERENCIAS

- BÖRGEL, J.** 1983. *Geomorfología y Geografía de Chile, Tomo II*. Instituto Geográfico Militar, 373 pp. Santiago.
- CARDONA, O.D.** 1991. *Evaluación de la Amenaza, la Vulnerabilidad y el Riesgo*. Taller Regional de Capacitación para la Administración de Desastres. ONAD/PNUD/OPS/OEA. Bogotá.
- CEMBRANO, J.; HERVÉ, F. & LAVENU, A.** 1996. The Liquiñe-Ofqui fault zone: a long-lived intra-arc fault system in southern Chile. *Tectonophysics*, 259, pp. 55–66.
- CRUDEN, D.M.** 1991. A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, Vol. 43: 27 pp.
- CRUDEN, D.M. & VARNES, D.J.** 1996. Landslide types and processes. En: Turner, A.K. & Schuster, R.L. (eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation*. Special Report 247. Transportation Research Board, National Research Council. National Academy Press, 675 pp. Washington, D.C.
- FOLGUERA, A.; MELNICK, D.; RADIC, J.P.; IAFFA, D. & RAMOS, V.A.** 2002. 37° to 39°S intraarc basin in the Southern Central Andes -Cenozoic activity of western Neuquén basin-. En: *Actas del 7° Congreso Internacional de Ciencias de la Tierra*, Simposio Internacional “Interacciones entre los volcanes y sus basamentos y los riesgos geológicos relacionados”. Electronic files. Santiago de Chile, pp. 1–18.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, V.; FERRER, M.; ORTUÑO, L. & OTEO, C.** 2002. *Ingeniería Geológica*. Pearson Educación, 744 pp. Madrid.
- GONZÁLEZ-FERRÁN, O. & VERGARA, M.** 1962. Reconocimiento geológico de la Cordillera de los Andes entre los paralelos 35°S y 38°S latitud sur. *Universidad de Chile, Instituto Geológico*, No. 24, 119 p.
- HAUSER, A.** 1993. Remociones en masa en Chile. *Boletín Nacional de Geología y Minería*, N° 45, pp. 7–29. Santiago.
- HIGHLAND, L.M. & BOBROWSKY, P.** 2008. *The landslide handbook: A guide to understanding landslides*. U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 pp. Virginia.
- KEEFER, D.K.** 1984. Landslides caused by earthquakes. *Bulletin of the Geological Society of America*, 95(4): 406–421.
- LANGE, D.; CEMBRANO, J.; RIETBROCK, A.; HABERLAND, C.; DAHM, V. & BATAILLE, K.** 2008. First seismic record for intra-arc strike-slip tectonics along the Liquiñe-Ofqui fault zone at the obliquely convergent plate margin of the southern Andes. *Tectonophysics*, 455: 14–24.
- LARA, L.; CEMBRANO, J. & LAVENU, A.** 2006. La Zona de Falla Liquiñe-Ofqui: Antecedentes de su evolución cuaternaria e implicancias para el volcanismo activo en los Andes del Sur. En: *XI Congreso Geológico Chileno*, Antofagasta, Chile. Actas, Vol. 2, Geodinámica Andina.
- LARA, M. & SEPÚLVEDA, S.** 2008. Remociones en masa. Apuntes del curso, Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 63 pp. Santiago.
- LLIBOUTRY, L.** 1965. *Traité de Glaciologie*, Tome 2: Glaciers, variations du climat, sols gelés. Masson, 246 pp. Paris.
- MELNICK, D.; FOLGUERA, A. & RAMOS, V.A.** 2006. Structural control on arc volcanism: The Cavihue–Copahue complex, Central to Patagonian Andes transition (38°S). *Journal of South American Earth Sciences*, 22: 66–88.
- MELNICK, D.; MORENO, M.S.; LANGE, D.; STRECKER, M.R. & ECHTLER, H.P.** 2008. Tectonic control on the 1960 Chile earthquake rupture segment. En: *7th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG, Nice)*. Resumen extendido, pp. 326–329.

- MORENO, M.S.; KLOTZ, J.; MELNICK, D.; ECHTLER, H.P. & BATAILLE, K.** 2008. Contemporary forearc deformation in south-central Chile from GPS observations (36–39°S). En: *7th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG, Nice)*. Resumen extendido, pp. 348–350.
- NIEMEYER, H. & MUÑOZ, J.** 1983. Hoja Laguna de la Laja, Región del Biobío. *Carta Geológica de Chile*, 1:250.000, No. 57, 52 p. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago.
- POPESCU, M.E.** 2002. Landslide causal factors and landslide remedial options. Keynote Lecture, *Proceedings of the 3rd International Conference on Landslides, Slope Stability and Safety of Infrastructures*, Singapore, pp. 61–81.
- SAURET, B.** 1987. Coulées boueuses. Laves torrentielles. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 150/151: 65–77.
- SIELFELD, G.** 2008. Cordón fisural Callaqui: Antecedentes tectónicos de la naturaleza y geometría del volcanismo fisural en el volcán Callaqui, Zona Volcánica Sur, Región del Biobío, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Concepción, 87 pp.
- SIELFELD, G.; CEMBRANO, J. & LARA, L.** 2017. Transtension driving volcano-edifice anatomy: Insights from Andean transverse-to-the-orogen tectonic domains. *Quaternary International*.
- VARNES, J.D.** 1984. *Landslide hazard zonation: A review of principles and practice*. Natural Hazards, Vol. 3, 63 pp. UNESCO, Paris.