



Universidad de Concepción
Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía
Departamento de Geografía

**SUSCEPTIBILIDAD ANTE REMOCIONES EN MASA EN ZONAS DE
TRASHUMANCIA DEL ALTO BIOBIO: TRAPA TRAPA Y BUTALELBÚN.**

MEMORIA DE TITULO

PARA OPTAR AL TITULO DE GEOGRAFO

Estudiante: Franco Ruben Martínez Hernández

Profesora guía: Dra. Edilia Jaque Castillo

Profesores co-guía: Dr. (c) Francisco Castro Venegas y Dr. (c) Cristian Beroiza

Fecha: 27 de Enero 2026

INDICE

INDICE	2
RESUMEN	5
I. INTRODUCCIÓN	7
1.1 Problema de investigación	10
1.2 Área de estudio	11
1.3 Preguntas de investigación	14
1.4 Hipótesis	14
1.5 Objetivo general	15
1.6 Objetivos específicos	15
II. METODOLOGÍA	16
2.1. Evaluación de susceptibilidad	16
2.1.1 Análisis de los factores condicionantes de la susceptibilidad a remociones en masa	19
2.2.1.1 Geología:	19
2.2.1.2 Geomorfología:	19
2.2.1.3 Topografía (alturas):	20
2.2.1.4 Pendientes.	20
2.2.1.5 Curvatura:	21
2.2.1.6 Orientación de laderas:	21
2.2.1.7 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	22
2.2 Validación estadística	24
III. MARCO TEORICO	25
3.1. Procesos de remoción en masa (PRM)	25
3.2. Factores condicionantes de la remoción en masa	25
3.3. Factores desencadenantes de remociones en masa	26
3.4. Tipos de remoción en masa	27
3.5. Enfoques teóricos y metodológicos para el estudio de procesos de remoción en masa	27
3.6. Contexto geodinámico del territorio chileno y Alto Biobío	28
3.7. Las remociones en masa como procesos geodinámicos relevantes en Chile y en territorios de montaña.	29
3.8. Configuración social y territorial en la exposición al riesgo de las comunidades trashumantes de alto Biobío	31

3.9. La trashumancia Pehuenche como practica territorial en Alto Biobío.	32
IV. RESULTADOS	34
4.1 Inventario de remociones en masa.	34
4.2 Factores condicionantes de las remociones en masa.....	37
4.2.1 Geología	37
4.2.2 Geomorfología.....	39
4.2.3 Modelo de elevación del terreno.....	43
4.2.4 Pendientes como factor desencadenante	46
4.2.5 Curvatura del Título de Merced Antonio Canio	48
4.2.6 Orientación de laderas.	51
4.2.7 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	54
4.3 Análisis de susceptibilidad	56
4.4 Validación de los resultados	60
5.1 Inventario de remociones en masa.....	62
5.2 Mapa de susceptibilidad	63
5.3 Valores AUC	64
VI. CONCLUSIONES	65
VII. REFERENCIAS	67
VII. ANEXO	72



Esta memoria de título se realizó en el marco del Grupo de investigación N° 24. U1.01 "Multiamenazas, Vulnerabilidades y Cambio Global.

RESUMEN

En las zonas rurales de la Región del Biobío, y particularmente en los territorios de alta montaña, los eventos de remociones en masa constituyen procesos recurrentes que afectan la estabilidad de laderas y las dinámicas socioambientales locales. En estos contextos, las actividades de trashumancia estacional desarrolladas por comunidades cordilleranas pueden verse directamente impactadas por dichos procesos, al mismo tiempo que ciertas prácticas de uso y tránsito por el territorio pueden incidir en su ocurrencia o distribución espacial.

La presente investigación analiza la susceptibilidad a remociones en masa en el Título de Merced Antonio Canio, ubicado en la comuna de Alto Biobío, Región del Biobío, territorio habitado históricamente por comunidades pehuenche que mantienen prácticas de trashumancia estacional. La problemática central del estudio se vincula a la carencia de información geoespacial actualizada y de evaluaciones sistemáticas de susceptibilidad, lo que limita la gestión del riesgo, incrementando la exposición de la población local a procesos de inestabilidad de laderas, especialmente durante los desplazamientos asociados a la trashumancia.

El objetivo principal es evaluar la susceptibilidad a remociones en masa mediante la aplicación del método estadístico de Tasa de Frecuencia (Frequency Ratio) (Lee & Biswajeet , 2006), integrando diversos factores condicionantes de carácter geológico, geomorfológico, topográfico y ambiental. Entre estos se consideraron la litología, las unidades geomorfológicas, la pendiente, la curvatura, la orientación de laderas, la altitud y la cobertura vegetal, estimada a partir del índice NDVI. La modelación se desarrolló a partir de la elaboración de un inventario de remociones en masa, que es el sustento de las relaciones estadísticas entre la ocurrencia de estos procesos y los factores condicionantes analizados.

La validación del modelo de susceptibilidad se realizó mediante el análisis de la curva ROC, herramienta estadística que permite evaluar la capacidad del modelo para discriminar entre áreas con presencia y ausencia de remociones en masa, a partir de la comparación entre la tasa de verdaderos positivos y falsos positivos, sintetizando su desempeño mediante el área bajo la curva (AUC).

El modelo permitió clasificar el territorio en cinco clases de susceptibilidad, identificando sectores que en las siguientes cinco categorías, Muy baja, Baja, Moderada, Alta y Muy alta, el área total es de 137 km² de los cuales Muy baja corresponde a 6 km² o al 4.38% de la superficie total, Baja tiene 32 km² correspondiendo al 23.36%, Moderada tiene 74 km² correspondiendo al 54.01%, Alta tiene 15 km² correspondiendo al 10.95% y Muy alta tiene 9 km² correspondiendo al 7.3% de la superficie total, mostrando la distribución del territorio con una notable inclinación a una susceptibilidad moderada.

Palabras clave: Susceptibilidad ante remociones en masa, trashumancia, Alto Biobío,

I. INTRODUCCIÓN

Los procesos de remociones en masa se definen como el desplazamiento descendente de suelo y roca bajo la acción de la gravedad, y engloba procesos como deslizamientos, caídas de rocas, flujos de detritos y avalanchas (ONEMI, 2016; SERNAGEOMIN, 2019). Estas dinámicas se agravan particularmente en áreas donde la geomorfología es irregular y la pendiente pronunciada, lo cual coincide con la expansión urbana hacia las bases precordilleranas de ciudades como Santiago y en la proliferación de asentamientos informales en zonas riesgosas (Campos, 2014; ONEMI, 2016; Sernageomin, 2019). Un estudio en la costa del fiordo Comau (X Región) reportó que un 35,4 % del área se clasificó como de alta susceptibilidad, porcentaje que guarda gran similitud con lo observado en zonas urbanizadas vulnerables (Almazán-Segovia et al., 2016). En el ámbito de los estudios sobre remociones en masa en Chile, se observa una marcada predominancia de metodologías cuantitativas, especialmente en la elaboración de mapas de susceptibilidad y en la evaluación de riesgos para la planificación territorial (Campos, 2014; Lara, 2007). Estas investigaciones suelen apoyarse en análisis estadísticos multivariados, modelos determinísticos y herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), permitiendo identificar zonas propensas a remociones en base a variables físicas como pendiente, litología, cobertura vegetal y sismicidad (Schachter, 2008; Campos, 2014). Por ejemplo, Schachter (2008) aplicó métodos estadísticos como la regresión logística y el análisis discriminante para evaluar la susceptibilidad a remociones en masa en la cuenca de Santiago, destacando la capacidad predictiva de estas técnicas. De forma similar, Campos (2014) utilizó un enfoque cuantitativo basado en la ponderación de factores condicionantes, siguiendo las metodologías propuestas por Lara (2007) y Muñoz (2013), como ejemplo reciente que refuerza la necesidad de inventarios detallados, en el cual se implementó un inventario multifuente de remociones en masa para el área metropolitana de Concepción, abarcando eventos de 1990 a 2023. Al comparar tres modelos de susceptibilidad dos basados en bases previas y uno en el nuevo inventario mediante el método de frecuencia relativa, demostraron que el modelo fundado en el inventario multifuente presentó una mayor precisión predictiva y

especificidad espacial, permitiendo zonificar con mayor confianza las áreas vulnerables (Castro-Venegas et al., 2025). Este resultado impulsa el uso de inventarios con la finalidad de obtener modelos predictivos más exactos.

La predominancia de los estudios cuantitativos también se refleja en los Estudios Fundados de Riesgo (EFR) requeridos por los Planes Reguladores Comunales (PRC). Un análisis de estos estudios realizado por Manríquez (2024) concluyó que las metodologías utilizadas se centran casi exclusivamente heurísticas basadas en conocimientos de expertos y sostenidas en ponderaciones aleatorias del rol de diferentes variables físicas cuantificables como pendiente, geología y geomorfología, mientras que aspectos sociales, como la percepción del riesgo o el conocimiento local, son escasamente considerados. Aunque las metodologías cualitativas podrían complementar el análisis técnico al incorporar la dimensión social del riesgo, su aplicación en estudios de remociones en masa en Chile sigue siendo marginal frente al enfoque cuantitativo dominante. En el caso de la susceptibilidad la presencia de más estudios cuantitativos es producto de los intereses sobre el área de estudio esto lleva a una mayor producción de insumos, existen casos en que la deficiente calidad de datos impide calcular la susceptibilidad y riesgo. En estos casos, la susceptibilidad se considera como un resultado en sí mismo (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2024). En el análisis de la susceptibilidad a remociones en masa, los métodos estadísticos que se basan en eventos ocurridos previamente han demostrado ofrecer resultados más precisos en la identificación de zonas de riesgo. Esto se debe a que estos modelos permiten establecer relaciones empíricas entre factores condicionantes y la ocurrencia real de deslizamientos, mejorando la capacidad predictiva del análisis (Araya Parra, 2014). Por el contrario, las metodologías que no requieren datos inventariados, como las evaluaciones cualitativas o heurísticas, dependen en gran medida de la experiencia del analista y pueden carecer de validación empírica, lo que limita su aplicabilidad en contextos de planificación territorial y gestión del riesgo (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2024). Por ello, la calidad y disponibilidad de inventarios históricos de remociones en masa resulta crucial para el éxito de los modelos estadísticos en la identificación de zonas de riesgo. A su vez las consecuencias por

eventos de remociones en masa representan una amenaza recurrente para las comunidades chilenas, generando pérdidas graves tanto a nivel material como humano, particularmente en zonas vulnerables. En Chile, la remoción en masa ha sido ampliamente reconocida como una de las amenazas naturales más frecuentes. Según el SERNAGEOMIN 2020), entre los años 2009 y 2019 se registraron 2.385 eventos de remoción en masa a lo largo del país, concentrándose especialmente en las regiones del centro-sur, donde influyen factores como la sismicidad, la pluviometría estacional y la geomorfología accidentada (SERNAGEOMIN, 2020). Además, reporta que anualmente ocurren múltiples eventos que destruyen viviendas, infraestructura vial y redes de servicios básicos, generando daños significativos en territorios rurales y urbanos. Según (Marín, et al, 2021), entre 1928 y 2017 se registraron 80 eventos fatales que provocaron 882 muertes (incluyendo 128 desaparecidos); un promedio de 11 víctimas fallecidas por evento, siendo los flujos de detritos responsables de aproximadamente el 42 % de estos decesos, seguidos por derrumbes y colapsos de relaves (SERNAGEOMIN, 2000). Esta frecuencia pone en evidencia que, aunque cada evento no siempre registre pérdidas humanas, cuando ocurren pueden ser catastróficos.

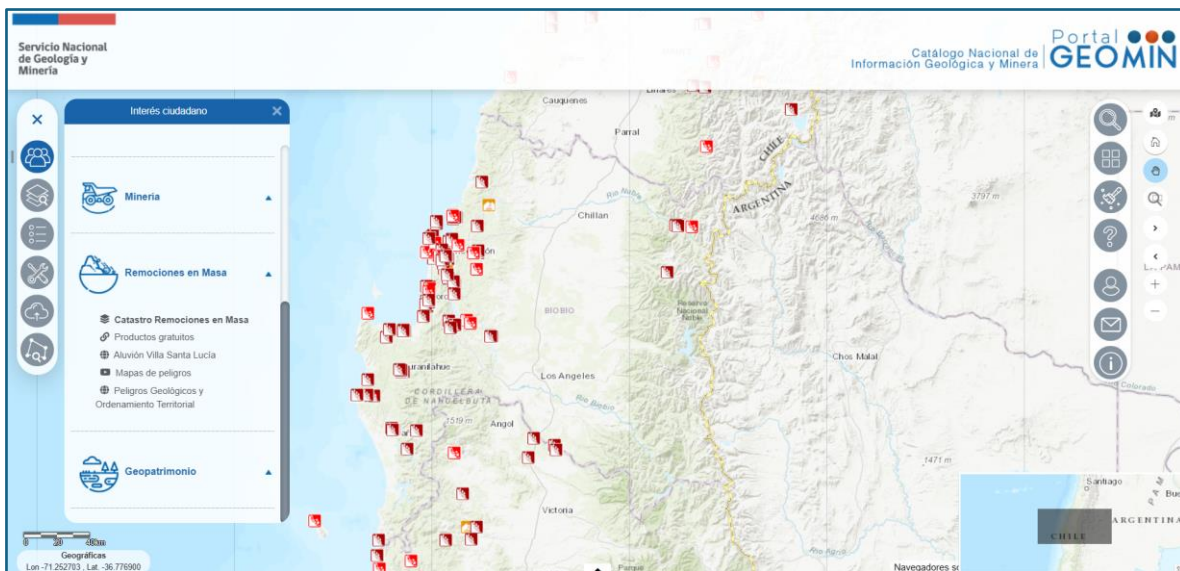
Los sectores de Trapa Trapa y Butalebún, en la cordillera andina de la región del Biobío, también se ven afectados por estos fenómenos y sus consecuencias, los eventos de remoción en masa han causado daños directos a la infraestructura comunitaria y han afectado severamente la vida cotidiana de sus habitantes. Según el Plan de Desarrollo Comunal, estas localidades están expuestas a múltiples procesos de remociones en masa, avalanchas y caídas de rocas debido a su ubicación en zonas de fuertes pendientes cordilleranas (Municipalidad de Alto Biobío, 2006). Un informe de la Oficina Nacional de Emergencia señala que, en junio de 2023, intensas lluvias provocaron remociones masivas que colapsaron caminos

y puentes, aislando a más de 700 personas, lo que interrumpió el acceso a salud, educación y alimentos (Radio Bío Bío, 2023).

1.1 Problema de investigación

Los Procesos de Remoción en Masa (PRM), como deslizamientos, flujos de detritos, caídas de rocas y avalanchas, representan una de las amenazas naturales más frecuentes y devastadoras en el territorio chileno, particularmente en zonas cordilleranas con condiciones geomorfológicas complejas, alta pluviosidad y actividad sísmica. Estos traen consigo impactos materiales, humanos y territoriales de gran magnitud. Sin embargo, la comprensión y gestión de esta amenaza en entornos rurales y cordilleranos sigue siendo limitada. En el contexto del Alto Biobío y en particular en comunidades como Trapa Trapa y Butalelbún las remociones en masa han ocasionado daños reiterados a la infraestructura crítica, afectando la conectividad y la seguridad de sus habitantes.

Figura 1. Catastro de remociones en masa en la región de Biobío



Fuente: Portal GEOMIN, SERNAGEOMIN, 2025

A pesar de ello, persiste una preocupante ausencia de estudios técnicos específicos, inventarios sistemáticos y cartografía de susceptibilidad actualizada que permita caracterizar adecuadamente la exposición y vulnerabilidad de estos territorios. Esta situación se ve agravada por el escaso enfoque territorial y la invisibilización de los sectores rurales en las políticas de planificación y gestión del riesgo, que han priorizado históricamente los centros urbanos. Al tratarse de un sector cordillerano el riesgo de que sucedan esta clase de eventos es mayor, No obstante, en territorios como el Alto Biobío, donde los inventarios de remociones en masa son escasos o inexistentes a pesar de ser zonas predispuestas a este tipo de eventos (Figura 1).

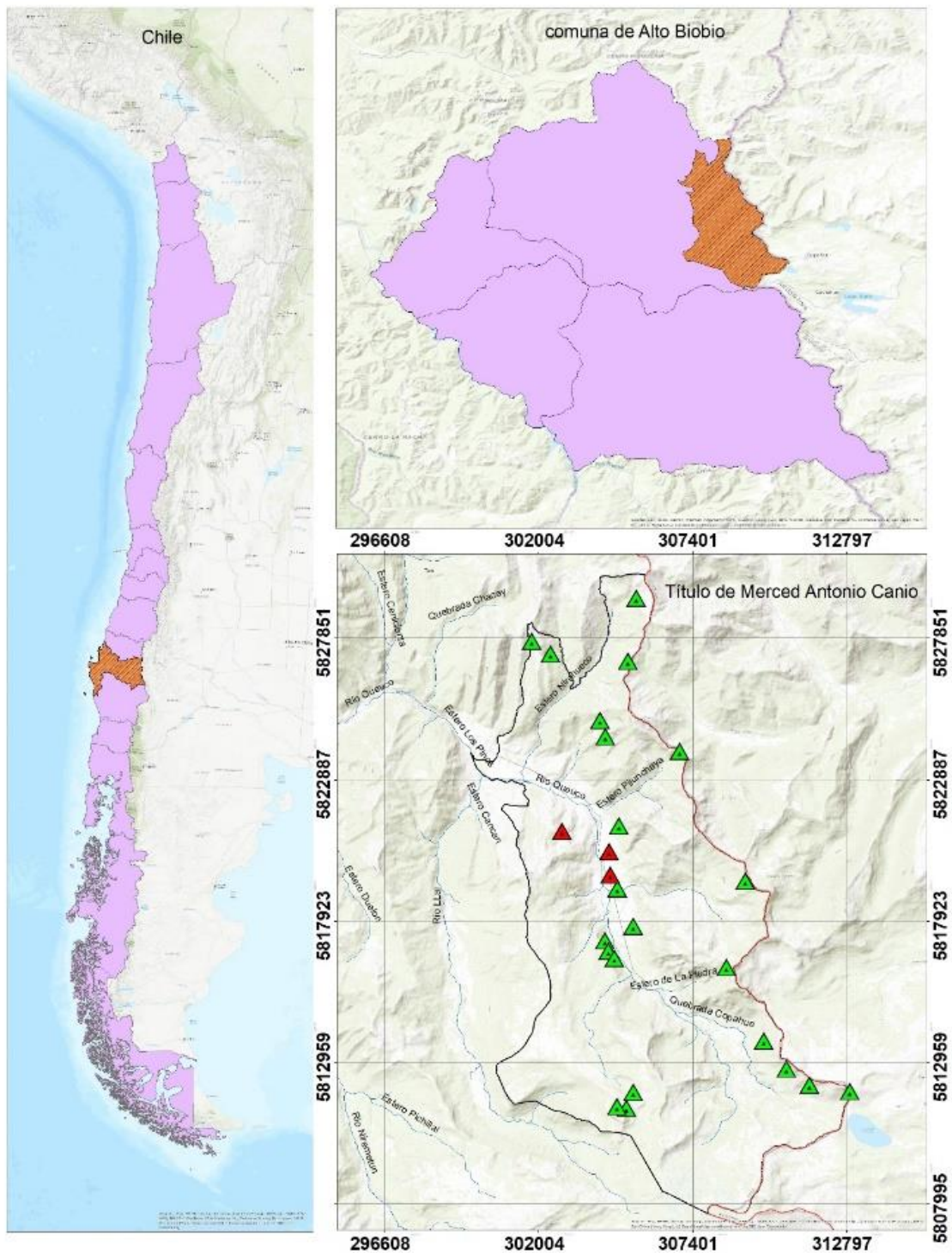
A ello se suma la ausencia de un enfoque integral que incorpore no solo variables geofísicas, sino también aspectos sociales y territoriales clave, como el conocimiento local, las estrategias de adaptación comunitaria y las formas específicas de ocupación del espacio. Esta desconexión entre la producción técnico-científica y las realidades vividas por comunidades indígenas como la pehuenche, profundiza la brecha entre riesgo identificado y riesgo experimentado, debilitando la eficacia de las estrategias de prevención y mitigación. En este marco, surge la necesidad urgente de desarrollar estudios que integren la dimensión geoespacial, social y territorial del riesgo por remociones en masa en contextos rurales de montaña, contribuyendo no solo a una mejor comprensión de la amenaza, sino también al fortalecimiento de capacidades locales de adaptación, resiliencia y planificación.

1.2 Área de estudio

La zona de estudio comprende los sectores cordilleranos de Trapa Trapa, Butalebún y el área conocida como “Título de Merced”, en la comuna de Alto Biobío, provincia del Biobío, Chile (Figura 2). Esta zona posee un área de 137 km² cuya delimitación abarca los valles del río Queuco y zonas altas utilizadas por comunidades pehuenche que se asentaron históricamente bajo títulos de merced otorgados durante las primeras décadas del siglo XX (Archivos Históricos de Alto Biobío, 2014; Revista Anfibia, 2024). Dicha documentación, que legalizó la

ocupación comunal de territorios que incluían veranadas e invernadas, refleja tanto el vínculo ancestral con el territorio como las tensiones surgidas tras su reconocimiento formal por el Estado chileno (Archivos Históricos de Alto Biobío, 2014).

Figura 2. Título de Merced de la comunidad Trapa Trapa Butalelbun



Fuente: Secretaría Ejecutiva IDE Chile, 2025. Elaboración propia

El Título de Merced Antonio Canio se caracteriza por fuertes pendientes, suelos volcánicos y cobertura vegetal de bosques nativos, aunque en baja densidad, con precipitaciones que superan los 2 000 mm al año (Municipalidad de Alto Biobío, 2024). Trapa Trapa y Butalebún se localizan dentro de este polígono de altitud variable (900–3100 m s.n.m.), en un territorio de baja densidad poblacional donde predominan viviendas de construcción sencilla y caminos de difícil acceso (Diagnóstico Participativo Alto Biobío, 2017). En este contexto montañoso, las condiciones orográficas combinadas con lluvias intensas hacen que la zona sea altamente susceptible a remociones en masa, fenómeno que amenaza tanto la seguridad física como la continuidad de la práctica trashumante, al interrumpir la conexión entre veranadas e invernadas tradicionalmente utilizadas por las familias pehuenche (Marchant, 2019; Lagos & Montecinos, 2023).

1.3 Preguntas de investigación

1. ¿Cómo se relacionan los factores condicionantes (la geología, geomorfología, topografía, pendientes, curvatura, orientación de laderas y Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) en la práctica de la trashumancia y las trayectorias territoriales de las comunidades pehuenche con la susceptibilidad a remociones en masa en los sectores del Título de Merced Antonio Canio?
2. ¿Cuáles son las zonas con mayor susceptibilidad a Procesos de Remoción en Masa en el territorio de uso trashumante y qué variables físicas condicionan su ocurrencia?
3. ¿Qué estrategias de adaptación y conocimiento local desarrollan las comunidades pehuenches frente a la amenaza de remociones en masa, y cómo pueden integrarse en el análisis de riesgo?

1.4 Hipótesis

Los distintos factores condicionantes presentes en el territorio del Título de Merced Antonio Canio, la geología, geomorfología, topografía, pendientes, curvatura, orientación de laderas y Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada influyen

de manera significativa en la susceptibilidad del área a la ocurrencia de remociones en masa. La interacción de estos rasgos físicos y ambientales configura un escenario territorial altamente propenso a procesos gravitacionales, lo cual incrementa el nivel de exposición y riesgo asociado a la práctica tradicional de trashumancia desarrollada por la población local.

En consecuencia, la distribución espacial de los factores analizados presente una correlación directa con las zonas de mayor inestabilidad, afectando la continuidad y seguridad de la gente local.

1.5 Objetivo general.

- Evaluar la susceptibilidad a remociones en masa en el sector del Título de Merced Antonio Canio, considerando los factores la geología, geomorfología, topografía, pendientes, curvatura, orientación de laderas y Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en zonas asociadas a la trashumancia pehuenche, con el fin de aportar herramientas concretas a la gestión de riesgos en contextos de montaña habitados ancestralmente.

1.6 Objetivos específicos.

- 1) Elaborar un inventario de remociones en masa en el título de merced Antonio Caniu en la comuna de Alto Biobío.
- 2) Caracterizar los factores físicos y territoriales que condicionan la ocurrencia de remociones en masa en áreas de uso trashumante.
- 3) Desarrollar un mapa de susceptibilidad ante remociones en masa en el título de merced Antonio Caniu en la comuna de Alto Biobío. Con el fin de identificar zonas críticas en las rutas y áreas de permanencia asociadas a la práctica de la trashumancia.
- 4) Validar estadísticamente el resultado del mapa de susceptibilidad de remoción en masa mediante el modelo de curva ROC

II. METODOLOGÍA

La presente investigación adopta un enfoque mixto de tipo descriptivo y explicativo, combinando métodos cuantitativos y cualitativos con el objetivo de evaluar la susceptibilidad a remociones en masa en los sectores de Trapa Trapa y Butalelbún, en la comuna de Alto Biobío, y su relación en la práctica de la trashumancia pehuenche y las consecuencias para su población.

Como parte del desarrollo metodológico de esta investigación, se llevó a cabo la elaboración de un inventario de remociones en masa en los sectores rurales de Trapa Trapa y Butalelbún, en la comuna de Alto Biobío. Este inventario permitirá identificar, registrar y caracterizar los eventos pasados de remociones en masa ocurridos en el territorio, con el objetivo de comprender su distribución espacial y frecuencia. Para ello, se empleará una estrategia de recopilación de información múltiple. En primer lugar, se utilizarán fotografías de archivo y registros visuales de diferentes portales, prensa y otras fuentes además de materiales obtenidos durante el trabajo de campo, lo que permitirá verificar la existencia de zonas de arrastre o acumulación de material y posibles áreas de mayor susceptibilidad. En segundo lugar, se recurrirá al análisis de portales de imágenes satelitales como Google Earth, Landsat y otros sistemas abiertos, los cuales facilitarán la detección de evidencias morfológicas de remociones en masa y permitirán evaluar la evolución temporal del paisaje afectado.

2.1. Evaluación de susceptibilidad

Se desarrolló a partir del modelo Tasa de Frecuencia (FR). Este método permite cuantificar la relación entre la distribución espacial de los eventos inventariados y los factores físicos y geomorfológicos previamente definidos, como pendiente, orientación de ladera, litología y cobertura vegetal. Para ello, se reclasificará cada variable en clases o intervalos homogéneos, por ejemplo, rangos de pendiente o tipos de formaciones geológicas utilizando herramientas SIG (ArcGIS).

El método del *Frequency Ratio* (FR) constituye una herramienta estadística fundamental en el análisis de susceptibilidad a remociones en masa, ya que permite establecer una relación cuantitativa entre la distribución espacial de los eventos

inventariados y los factores condicionantes del terreno. En el contexto del Título de Merced de Trapa Trapa y Butalebún, su aplicación resulta especialmente relevante debido a la naturaleza montañosa del territorio, caracterizado por una alta heterogeneidad topográfica y ambiental, donde las pendientes pronunciadas, la cobertura vegetal discontinua y las variaciones litológicas influyen directamente en la estabilidad de las laderas. El *Frequency Ratio* facilita la identificación de los factores que más contribuyen a la ocurrencia de remociones en masa dentro del área de estudio. Mediante este enfoque, se calcula la proporción entre la frecuencia de deslizamientos observados en una determinada clase de un factor (por ejemplo, una categoría de pendiente o tipo de suelo) y la frecuencia total de dicha clase en el área total. De esta forma, se obtiene un valor que expresa la fuerza de asociación entre la presencia de un factor específico y la ocurrencia de remociones en masa. Valores de FR mayores que 1 indican una correlación positiva, es decir, una mayor probabilidad de que en esa clase se produzcan remociones; en cambio, valores menores que 1 señalan una relación débil o negativa.

El uso del FR permite jerarquizar los factores condicionantes levantados tales como pendiente, orientación, altitud, cobertura vegetal y litología en función de su influencia sobre la ocurrencia de remociones identificadas mediante fotointerpretación. Estos factores contribuyen a una comprensión más profunda de las dinámicas geomorfológicas que afectan el territorio del Alto Biobío. De este modo, el FR actúa como un puente entre la información observacional del inventario y la modelación espacial del riesgo, aportando una herramienta para la toma de decisiones en materia de planificación territorial y gestión de riesgos naturales.

$$FR = \frac{\frac{L_i}{L_{tot}}}{\frac{X_i}{X_{tot}}}$$

donde:

FR: Frequency Ratio de la clase i .

L_i : número de deslizamientos que ocurren dentro de la clase i .

L_{tot} : número total de deslizamientos en el área de estudio.

X_i : número de píxeles o área correspondiente a la clase i del factor

condicionante.

X_{tot} : número total de píxeles o área total del mapa.

Esta clasificación constituye un insumo esencial no solo para la interpretación geomorfológica del área de estudio, sino también para la planificación territorial y la toma de decisiones en materia de prevención de riesgos en comunidades locales, como las que habitan el Título de Merced.

A continuación, se calcula la proporción de superficie de remociones dentro de cada clase y se comparará con la proporción de superficie que representa esa clase respecto al área total de estudio. La relación resultante se expresa como un índice FR, donde valores superiores a uno indican una mayor probabilidad de ocurrencia de remociones en esa clase específica. Este procedimiento se repetirá para cada factor y sus clases correspondientes, obteniendo así un conjunto de índices que permiten jerarquizar la influencia relativa de cada variable.

Finalmente, los índices FR se integrarán en un modelo multicriterio de susceptibilidad, ponderando cada factor de acuerdo con su importancia relativa y combinando las capas resultantes en un solo mapa temático. Este mapa mostrará las zonas con mayor probabilidad de remociones en masa dentro del área de uso trashumante, permitiendo contrastarlas con las rutas y sectores de permanencia de la trashumancia pehuenche. Esta etapa será clave para interpretar de forma integrada la relación entre la configuración física del territorio y la exposición diferencial de las comunidades locales, generando información aplicada que sirva de base para fortalecer estrategias de gestión de riesgos y planificación territorial en contextos de montaña.

2.1.1 Análisis de los factores condicionantes de la susceptibilidad a remociones en masa.

2.2.1.1 Geología:

La información geológica constituye un insumo fundamental para el análisis de la susceptibilidad a remociones en masa, dado que las características litológicas y geotécnicas de los materiales condicionan directamente su comportamiento frente a procesos de inestabilidad de laderas. En particular, el tipo de material geológico influye en propiedades como la cohesión, la permeabilidad y la resistencia al corte, factores clave en la ocurrencia de remociones en masa. Para la obtención de esta información se utilizaron datos geológicos oficiales disponibles en la plataforma ArcGIS Online del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), asegurando el uso de información actualizada y validada para la zona de estudio. La cartografía geológica fue posteriormente integrada al análisis espacial como variable condicionante del modelo de susceptibilidad.

2.2.1.2 Geomorfología:

La geomorfología del terreno constituye un factor condicionante fundamental en el análisis de la susceptibilidad a remociones en masa, ya que define la forma, el origen y la dinámica de los procesos que modelan el relieve. Las unidades geomorfológicas influyen directamente en la estabilidad de las laderas, al controlar variables como la pendiente, la curvatura, la orientación, los patrones de acumulación de materiales y la presencia de discontinuidades morfoestructurales que favorecen la ocurrencia de deslizamientos.

La información geomorfológica utilizada en este estudio fue obtenida a partir de cartografía especializada disponible en los archivos institucionales de la Universidad de Concepción, específicamente desde la plataforma I2GEO desarrollada por el Grupo de Investigación Multiamenazas Biobío. Esta base de datos corresponde a un levantamiento geomorfológico detallado, generado mediante fotointerpretación, análisis geomorfológico y validación en terreno.

Las unidades geomorfológicas consideradas en el análisis incluyen: abanico aluvial, canal, cerro isla, colada de lava (indiferenciada), cono compuesto (estratovolcán), cordón montañoso, depósito coluvial, escarpe de remoción en masa, llanura aluvial, llanura fluvio-glaciaria, terrazas fluviales (indiferenciada y niveles I, II y III) y valle o artesa glaciares. Estas unidades fueron integradas al modelo como variable condicionante, permitiendo representar de manera diferenciada los contextos geomorfológicos asociados a distintos grados de susceptibilidad a remociones en masa.

2.2.1.3 Topografía (alturas):

La caracterización topográfica del Título de Merced Antonio Canio se realizó a partir de información altimétrica obtenida desde una capa de curvas de nivel disponible en la plataforma de la Infraestructura de Datos Espaciales de Chile (IDE Chile), cuya fuente original corresponde al Ministerio del Medio Ambiente. A partir de esta información se extrajeron los valores de altitud, los cuales fueron posteriormente reclasificados en intervalos definidos según rangos altitudinales relevantes para el área de estudio. Estos intervalos fueron representados cartográficamente mediante una simbología graduada, permitiendo la elaboración de un mapa topográfico que describe la distribución espacial de las alturas y su relación con los procesos geomorfológicos y de remoción en masa analizados.

2.2.1.4 Pendientes.

El mapa de pendientes se elaboró utilizando la misma capa de curvas de nivel empleada en el análisis topográfico, la cual presenta una equidistancia vertical de 25 metros. Estas curvas fueron procesadas en el software ArcGIS para generar un Modelo Digital de Elevación (DEM), a partir del cual se calculó la pendiente mediante la herramienta *Slope*, obteniendo valores expresados en grados. Posteriormente, la pendiente fue reclasificada en intervalos angulares que facilitan su interpretación y análisis.

Dado su rol fundamental en el control de la estabilidad de laderas, la pendiente constituye una de las variables más relevantes en el análisis de susceptibilidad a remociones en masa. La clasificación de los intervalos se basó en el trabajo de

referencia de Roberta da Silva et al. (2023), donde se proponen rangos específicos de inclinación asociados a distintos niveles de susceptibilidad. Los intervalos considerados fueron: 0° – 10° , correspondientes a zonas potenciales de deposición; 10° – 20° , asociadas a un bajo potencial de deslizamientos y generalmente aptas para uso humano; 20° – 30° , con potencial medio de deslizamientos y restricciones de uso; 30° – 45° , considerados ángulos críticos de ruptura de taludes con alto potencial de inestabilidad; y pendientes mayores a 45° , caracterizadas por taludes altamente inestables, con suelos delgados o presencia de acantilados rocosos. Esta clasificación permitió discriminar áreas con distintos grados de propensión a la ocurrencia de remociones en masa, desde sectores de baja pendiente hasta laderas de alta peligrosidad geomorfológica.

2.2.1.5 Curvatura:

El mapa de curvatura se generó a partir del mismo Modelo Digital de Elevación (DEM) empleado en los análisis morfométricos previos, correspondiente a la misma zona de estudio. Para ello, se utilizó la herramienta Curvature del software ArcGIS, la cual permite calcular la segunda derivada del relieve y evaluar los cambios en la pendiente de la superficie topográfica. Esta herramienta entrega información sobre la forma del terreno, diferenciando sectores convexos, cóncavos y planos, los cuales influyen en la convergencia o divergencia de flujos superficiales, la acumulación de agua y sedimentos, y la estabilidad de las laderas. En este sentido, la curvatura constituye una variable relevante para el análisis de procesos geomorfológicos y de susceptibilidad a remociones en masa.

2.2.1.6 Orientación de laderas:

El mapa de orientación de laderas se generó a partir del Modelo Digital de Elevación (DEM) utilizado en el resto de los análisis morfométricos, correspondiente a la misma zona de estudio. La orientación fue calculada mediante la herramienta Aspect del software ArcGIS, la cual determina la dirección de máxima pendiente para cada celda del DEM, expresada en grados azimutales. Posteriormente, los valores continuos obtenidos fueron reclasificados en categorías discretas de orientación, definidas siguiendo criterios ampliamente utilizados en la literatura

geomorfológica y de análisis de susceptibilidad a remociones en masa. Las clases consideradas fueron: plano (-1), norte (0–22,5° y 337,5–360°), noreste (22,5–67,5°), este (67,5–112,5°), sureste (112,5–157,5°), sur (157,5–202,5°), suroeste (202,5–247,5°), oeste (247,5–292,5°) y noroeste (292,5–337,5°). Esta variable fue incorporada al análisis debido a su influencia en la radiación solar, la humedad edáfica y la distribución de la cobertura vegetal, factores que inciden directamente en la estabilidad de las laderas.

2.2.1.7 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

La capa de información correspondiente a la cobertura vegetal se obtuvo a partir de imágenes satelitales descargadas desde la plataforma del United States Geological Survey (USGS), utilizando datos de la constelación Landsat 8. A partir de estas imágenes se calculó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), un indicador espectral ampliamente utilizado para estimar la densidad y vigor de la vegetación, basado en la relación entre la reflectancia del infrarrojo cercano (NIR) y del rojo (RED). El NDVI se calculó mediante la expresión $(NIR - RED) / (NIR + RED)$, empleando la banda 5 (infrarrojo cercano) y la banda 4 (rojo) de Landsat 8. Este procedimiento permitió generar una capa continua de cobertura vegetal, utilizada posteriormente como variable representativa de la cobertura de suelos en el análisis.

Tabla N1 Bases de datos de factores condicionantes

Dimensión	Variable	Categorías de reclasificación	Fuente
25	Pendiente	0° a 10° 10° a 20° 20° a 30° 30° a 45° > 45°	Ministerio de medioambiente (2025)
25	Orientación de ladera	Plano (-1) Norte (0 - 22,5) Noreste (22,5 - 67,5) Este (67,5 - 112,5) Sureste (112,5 - 157,5) Sur (157,5 - 202,5) Suroeste (202,5 - 247,5) Oeste (247,5 - 292,5) Noroeste (292,5 - 337,5) Norte (337,5 - 360)	Ministerio de medioambiente (2025)

25	Elevación	40-1340 msnm 1341-1780 msnm 1781-2220 msnm 2221-2660 msnm 2661-3100 msnm	Ministerio de medioambiente (2025)
25	Curvatura	< (-2) (-2) – (2) > 2	Ministerio de Medioambiente (2025)
25	Geomorfología	Abanico aluvial Canal Cerro isla Colada de lava (indiferenciada) Cono compuesto (estratovolcán) Cordón montañoso Depósito coluvial Escarpe de remoción en masa Llanura aluvial Llanura fluvio-glaciaria Terraza fluvial (indiferenciada) Terraza fluvial nivel I Terraza fluvial nivel II Terraza fluvial nivel III Valle glaciar / Artesa glaciar	I2GEO platform from Multihazards Biobio Study Group, University of Concepción https://geomorfologia.udec.cl/
25	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	Cuerpos de agua (<-0.042) Terreno edificado y estéril (-0.042 – 0.182) Pasto (0.182–0.327) Vegetación escasa (0.327–0.425) Vegetación densa (0.425–0.503) Vegetación muy densa (>0.503)	USGS Landsat 8 (2025)
25	Geología	Rocas volcánicas Rocas volcanosedimentarias Rocas sedimentarias	SERNAGEOMIN (2025)

Fuente: Fuente: Elaboración propia 2025

2.2 Validación estadística

La utilización de la curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*) como método de validación estadística resulta pertinente en esta investigación, ya que permite evaluar de manera objetiva y cuantitativa el desempeño predictivo del modelo de susceptibilidad a remociones en masa. A través del cálculo del Área Bajo la Curva (AUC), este método mide la capacidad del modelo para discriminar correctamente entre sectores donde se han registrado remociones en masa y áreas consideradas estables, proporcionando una evaluación independiente de juicios cualitativos o interpretaciones visuales. Este enfoque es particularmente relevante en contextos territoriales complejos, como el Título de Merced Antonio Canio, donde los factores condicionantes presentan una alta variabilidad espacial y relaciones no lineales. En este sentido, la curva ROC constituye un indicador robusto y ampliamente validado en estudios de susceptibilidad, (Castro-Venegas et al, 2025) permitiendo respaldar estadísticamente la confiabilidad y consistencia del modelo propuesto.

El uso de la curva ROC como método de validación estadística es pertinente para esta investigación porque permite evaluar de manera objetiva la capacidad predictiva del modelo de susceptibilidad a remociones en masa. A través del cálculo del AUC, la curva ROC cuantifica qué tan bien el modelo distingue entre áreas donde han ocurrido remociones y áreas estables, evitando depender únicamente de interpretaciones cualitativas. Este enfoque es especialmente útil en contextos territoriales complejos como el Título de Merced Antonio Canio, donde los factores condicionantes presentan variabilidad espacial significativa. Así, la curva ROC proporciona un indicador robusto.

III. MARCO TEORICO

3.1. Procesos de remoción en masa (PRM)

Los procesos de remoción en masa (PRM) son fenómenos geodinámicos que implican el desplazamiento de masas de suelo, detritos o roca ladera abajo, producto principalmente de la fuerza de gravedad y condicionados por factores como la pendiente, la litología, la estructura geológica y la cobertura vegetal (Sepúlveda & Serey, 2009). Según Cruden y Varnes (1996), se clasifican en deslizamientos, caídas, flujos y reptación, dependiendo de la velocidad del desplazamiento y el tipo de material involucrado. Chile, al estar emplazado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, combina una geodinámica activa, sismicidad recurrente y condiciones climáticas que favorecen la ocurrencia de estos fenómenos. La región de Alto Biobío presenta un relieve abrupto, con pendientes pronunciadas y litología predominantemente volcánica y sedimentaria, que favorecen la inestabilidad de laderas (van Westen et al., 2008). Los factores condicionantes más relevantes incluyen la pendiente, la orientación de las laderas, la geomorfología, la cobertura del suelo y la acción antrópica, como la deforestación y las prácticas de uso del suelo. Además, eventos climáticos extremos, intensificados por el cambio climático, como lluvias torrenciales, incrementan la saturación de suelos y favorecen la ocurrencia de remociones en Masa (Lagos & Montecinos, 2023). En este contexto, Castro-Venegas et al. (2025) destacan la importancia de contar con inventarios multifuente para la evaluación de susceptibilidad y planificación del territorio, subrayando que la falta de información histórica limita la capacidad de anticipación frente a estos procesos. Por lo tanto, la generación de modelos de susceptibilidad que integren variables físicas y geomorfológicas es una herramienta clave para la gestión de riesgos en zonas rurales de montaña (Araya-Parra, 2014).

3.2. Factores condicionantes de la remoción en masa

Los factores condicionantes determinan la susceptibilidad de un terreno a experimentar movimientos en masa. Hauser (2000) subraya que estos factores incluyen principalmente la pendiente del terreno, la litología, la estructura geológica y el uso del suelo. En Chile, la combinación de pendientes pronunciadas y

materiales geológicamente inestables, como rocas metamórficas fracturadas o depósitos volcánicos poco consolidados, eleva significativamente la probabilidad de remociones. Van Westen et al. (2006) destacan que la pendiente es el factor topográfico más influyente: a mayor inclinación, mayor es la componente de fuerza gravitacional que actúa sobre el material. Además, la orientación de laderas puede favorecer la acumulación de agua, aumentando la presión intersticial y reduciendo la cohesión de los materiales (Van Westen, 2006).

La litología y la estructura interna de los materiales también desempeñan un papel clave. Materiales arcillosos o capas de ceniza volcánica, comunes en la zona sur de Chile, pueden saturarse fácilmente, actuando como planos de deslizamiento. Según Cruden y Varnes (1996), la disposición de estratos, fracturas y fallas geológicas facilita la ocurrencia de movimientos cuando la resistencia interna del material es superada. El factor uso del suelo es particularmente relevante en contextos rurales y de montaña. La deforestación, la expansión agrícola no planificada y la construcción de caminos de acceso sin criterios técnicos pueden desestabilizar laderas previamente estables (Sepúlveda & Serey, 2009). Por ello, la cartografía de susceptibilidad debe integrar variables físicas y antrópicas para reflejar escenarios realistas (García Rodríguez et al., 2021).

3.3. Factores desencadenantes de remociones en masa

Mientras los factores condicionantes establecen la base, los factores desencadenantes actúan como detonantes inmediatos. En Chile, la precipitación intensa y prolongada es el principal disparador de eventos de remoción en masa (Sepúlveda & Serey, 2009). Hauser (2000) explica que lluvias extremas aumentan la saturación de suelos, reduciendo la fricción interna y generando planos de falla.

La sismicidad, por su parte, es un desencadenante crítico en el contexto andino. Chile, como uno de los países más sísmicos del mundo, presenta registros frecuentes de remociones masivas activadas por terremotos mayores (SERNAGEOMIN, 2020).

3.4. Tipos de remoción en masa

Las remociones en masa se clasifican según la velocidad de movimiento, el material involucrado y la dinámica del desplazamiento. Cruden y Varnes (1996) establecieron una tipología ampliamente aceptada, que distingue entre caídas, deslizamientos, flujos y reptaciones.

- Caídas: Movimientos bruscos de fragmentos de roca o detritos desde pendientes escarpadas. Frecuentes en taludes rocosos.
- Deslizamientos: Desplazamientos coherentes de masas de suelo o roca a lo largo de planos de falla. Son los más estudiados en Chile (Hauser, 2000).
- Flujos: Movimientos rápidos de materiales saturados, como flujos de detritos y lodo. En zonas volcánicas chilenas se manifiestan como lahares.
- Reptación: Movimiento extremadamente lento del suelo superficial, observable a largo plazo.

Guzzetti et al. (2012) destacan que cada tipo de remoción implica distintas magnitudes de daño y exige metodologías específicas de evaluación y mitigación. Por ello, los inventarios multifuente y los SIG resultan esenciales para distinguir patrones espaciales y temporales (Guzzetti et al., 2012).

3.5. Enfoques teóricos y metodológicos para el estudio de procesos de remoción en masa

El estudio de los procesos de remoción en masa requiere enfoques metodológicos robustos que combinen métodos deterministas y probabilísticos. Los enfoques deterministas se basan en modelos geotécnicos y físicos que simulan la estabilidad de taludes y la probabilidad de falla bajo condiciones específicas. Por otro lado, los métodos probabilísticos, como los modelos bivariados, multivariados o heurísticos, permiten establecer correlaciones estadísticas entre variables condicionantes y la ocurrencia de remociones (van Westen et al., 2008). Herramientas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) resultan fundamentales para el análisis espacial de susceptibilidad, ya que posibilitan la integración y modelación de variables como pendiente, orientación, litología y uso del suelo (Araya-Parra, 2014).

La aplicación de modelos de regresión logística, árboles de decisión y análisis discriminante fortalece la identificación de zonas críticas y permite una planificación territorial más precisa (Castro-Venegas et al., 2025). Se propone aplicar un modelo de análisis multicriterio en ArcGIS, integrando variables derivadas de imágenes satelitales (Google Earth, Landsat 8) y capas de información de portales oficiales como SERNAGEOMIN e IDE Chile. Este enfoque permitirá construir un inventario de Remoción en Masa, verificarlo en terreno y analizar la distribución espacial de zonas susceptibles a lo largo de rutas trashumantes.

3.6. Contexto geodinámico del territorio chileno y Alto Biobío

El Alto Biobío es una zona de transición cordillerana ubicada en el límite sur de la Región del Biobío, caracterizada por cordones montañosos abruptos, suelos de origen volcánico, redes hidrográficas activas y una elevada pluviosidad estacional (Sepúlveda & Serey, 2009). Históricamente, eventos de remoción en masa han afectado caminos rurales, viviendas y rutas de conexión esenciales para comunidades pehuenche (Castro-Venegas et al., 2025). La trashumancia constituye una práctica socioecológica ancestral mediante la cual las familias pehuenches se desplazan estacionalmente entre zonas bajas (invernadas) y zonas altas (veranadas) para garantizar la disponibilidad de forraje y recursos naturales a lo largo del año (Barrientos & Salazar, 2017). Este sistema de movilidad vertical está profundamente ligado al conocimiento ecológico tradicional (TEK), que articula saberes sobre clima, suelos, vegetación y rutas de tránsito (Berkes et al., 2000; Toledo, 2001).

Sin embargo, la exposición a procesos de remoción en masa impacta de forma directa la viabilidad de esta práctica. Las rutas de desplazamiento atraviesan laderas inestables y zonas susceptibles a derrumbes, incrementando la exposición a amenazas naturales y generando riesgos diferenciales (Cutter, 2003). La falta de estudios de detalle y de información geoespacial actualizada limita la capacidad de planificación y adaptación de estas comunidades frente a amenazas geodinámicas (Wisner et al., 2004; Gaillard & Mercer, 2013).

3.7. Las remociones en masa como procesos geodinámicos relevantes en Chile y en territorios de montaña.

Las remociones en masa son procesos de desplazamiento de materiales del terreno, como suelo, detritos o roca, generados por la acción gravitacional y condicionados por múltiples factores como la pendiente, la litología, la cobertura vegetal y la sismicidad (Sepúlveda & Serey, 2009). En Chile, dada su compleja geodinámica y geografía montañosa, este tipo de fenómenos se presentan de forma recurrente tanto en zonas urbanas como rurales. Se clasifican comúnmente en deslizamientos, caídas, flujos y reptación, dependiendo del tipo de material involucrado y la velocidad del movimiento (Cruden & Varnes, 1996).

Figura 3: remoción en masa reciente en la Región del Biobío, evidenciando deslizamientos de ladera e interrupción de caminos



Fuente: Resumen.cl (2024).

Para evaluar la probabilidad de ocurrencia de estos procesos, se utiliza el concepto de susceptibilidad a remociones en masa, el cual se refiere a la propensión de una determinada área a experimentar movimientos del terreno en función de sus características físicas, sin considerar aún el factor temporal (Van Westen et al., 2006). A diferencia de la peligrosidad que integra la frecuencia esperada de los eventos o del riesgo que considera además la exposición y vulnerabilidad humana, la susceptibilidad constituye una etapa preliminar pero crucial en los análisis de riesgo geológico. En los últimos años, la aplicación de modelos estadísticos multivariados, junto con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), ha permitido mejorar significativamente la capacidad predictiva de los estudios de susceptibilidad, sobre todo cuando se cuenta con inventarios históricos de remociones previas (Araya Parra, 2014).

En paralelo, esta investigación se sitúa en un territorio habitado por comunidades pehuenche, cuyo modo de vida se estructura en torno a la trashumancia. Este sistema de movilidad estacional implica el desplazamiento entre zonas bajas (invernadas) y altas (veranadas), permitiendo el aprovechamiento sostenible de los recursos del ecosistema andino a lo largo del año. Más allá de su funcionalidad económica, la trashumancia constituye una práctica cultural cargada de significado simbólico, articulando la relación entre las familias, el territorio y la espiritualidad mapuche, especialmente en su vínculo con la ñuke mapu o madre tierra (Marchant, 2019).

Sin embargo, tanto las remociones en masa como los efectos del cambio climático que ha intensificado las lluvias extremas y aumentado la frecuencia de estos eventos amenazan con desestructurar esta forma de vida. En este escenario, la ausencia de información geoespacial detallada y actualizada sobre amenazas geológicas constituye una barrera crítica para la protección de estas comunidades.

Figura 4. Arreo de ganado durante la trashumancia pehuenche, en la cordillera de la Araucanía.



Fuente: Marchant (2020)

3.8. Configuración social y territorial en la exposición al riesgo de las comunidades trashumantes de alto Biobío.

El riesgo se comprende como una construcción social en la que interactúan factores físicos y condiciones socioeconómicas (Lavell, 2003). En el Alto Biobío, las comunidades trashumantes y pehuenche enfrentan una serie de desigualdades estructurales que condicionan su exposición y capacidad de respuesta ante riesgos de multi-amenaza. Según Zúñiga Armijo et al. (2022), una de las barreras centrales radica en la débil presencia del Estado en territorios rurales dispersos, donde se observa “la dificultad de acceso a las localidades debido a la precariedad de caminos y la dependencia de rutas de montaña” (Zúñiga Armijo et al., 2022, p. 6). Esta precariedad vial incide directamente en la posibilidad de recibir ayuda oportuna, evacuarse y mantener conectividad con centros urbanos. A esto se suma una falta de información técnica clara y accesible para la población local: muchas

familias dependen de canales informales o de redes comunitarias para enterarse de situaciones de emergencia, lo que revela una brecha en la transmisión de conocimiento oficial (Zúñiga Armijo et al., 2022)., debido a la lejanía con los centros urbanos y la falta de infraestructura, la institucionalidad municipal, regional además de otras entidades deben de formar parte de la comunicación y colaboración para la reducción del riesgo, además de políticas públicas que permitan una gestión con un enfoque más amplio (Zúñiga Armijo et al., 2022, p. 8). En conjunto, estas limitaciones antes mencionadas reproducen situaciones de vulnerabilidad que, combinadas con la geografía cordillerana y los efectos del cambio climático, amplifican el riesgo para estas comunidades trashumantes, cuya movilidad y forma de habitar dependen precisamente de un territorio físicamente hostil y de infraestructura crítica en condiciones subóptimas. Estas condiciones refuerzan la marginalización territorial, agravando la vulnerabilidad frente a eventos de remoción en masa. Además, la invisibilización de los territorios cordilleranos dentro de los sistemas de gestión del riesgo limita la implementación de medidas de mitigación adaptadas a su realidad.

3.9. La trashumancia Pehuenche como practica territorial en Alto Biobío.

La trashumancia pehuenche constituye una de las expresiones más claras de la articulación entre territorio, cultura y modos de vida sustentables en la cordillera andina del sur de Chile. Esta forma de movilidad estacional implica el traslado de familias, animales y enseres entre zonas de invernada generalmente valles bajos y resguardados durante el invierno y zonas de veranada, ubicadas a mayor altitud, donde abundan pastos y forraje durante la temporada estival.

La práctica trashumante se basa en un conocimiento ecológico tradicional (CET), acumulado y transmitido de forma intergeneracional, que orienta decisiones sobre la selección de rutas, épocas de traslado y manejo del ganado en función de la variabilidad climática y la disponibilidad de recursos (Berkes et al., 2000). Este saber local permite que las comunidades mantengan un equilibrio entre el aprovechamiento de los recursos y la conservación de los ecosistemas, constituyendo un ejemplo de manejo socioecológico adaptativo.

En el Alto Biobío, la trashumancia se estructura sobre un patrón de movilidad vertical que configura una red territorial compleja, integrada por pasos de montaña, corrales, zonas de agua y refugios temporales, todos ellos anclados en la cosmovisión mapuche-pehuenche y su relación con la ñuke mapu (madre tierra) (Marchant, 2019). Esta perspectiva enfatiza la necesidad de incorporar la visión y experiencia de las comunidades en los estudios de susceptibilidad y en la planificación del riesgo, evitando enfoques exclusivamente técnico-científicos que invisibilicen la agencia local (Berkes et al., 2000). Se busca aportar a la comprensión de cómo los procesos de remoción en masa afectan la continuidad y seguridad de la trashumancia, explorando no sólo las variables físicas y geológicas que determinan la inestabilidad del terreno, sino también las estrategias de mitigación y adaptación desarrolladas por los pehuenches para enfrentar estos riesgos. Integrar estos saberes en los modelos de análisis de susceptibilidad contribuirá a fortalecer la planificación territorial y la resiliencia de estas comunidades frente a fenómenos geodinámicos que, de intensificarse, podrían comprometer seriamente la viabilidad de esta práctica milenaria (Berkes et al., 2000).

IV. RESULTADOS

4.1 Inventario de remociones en masa.

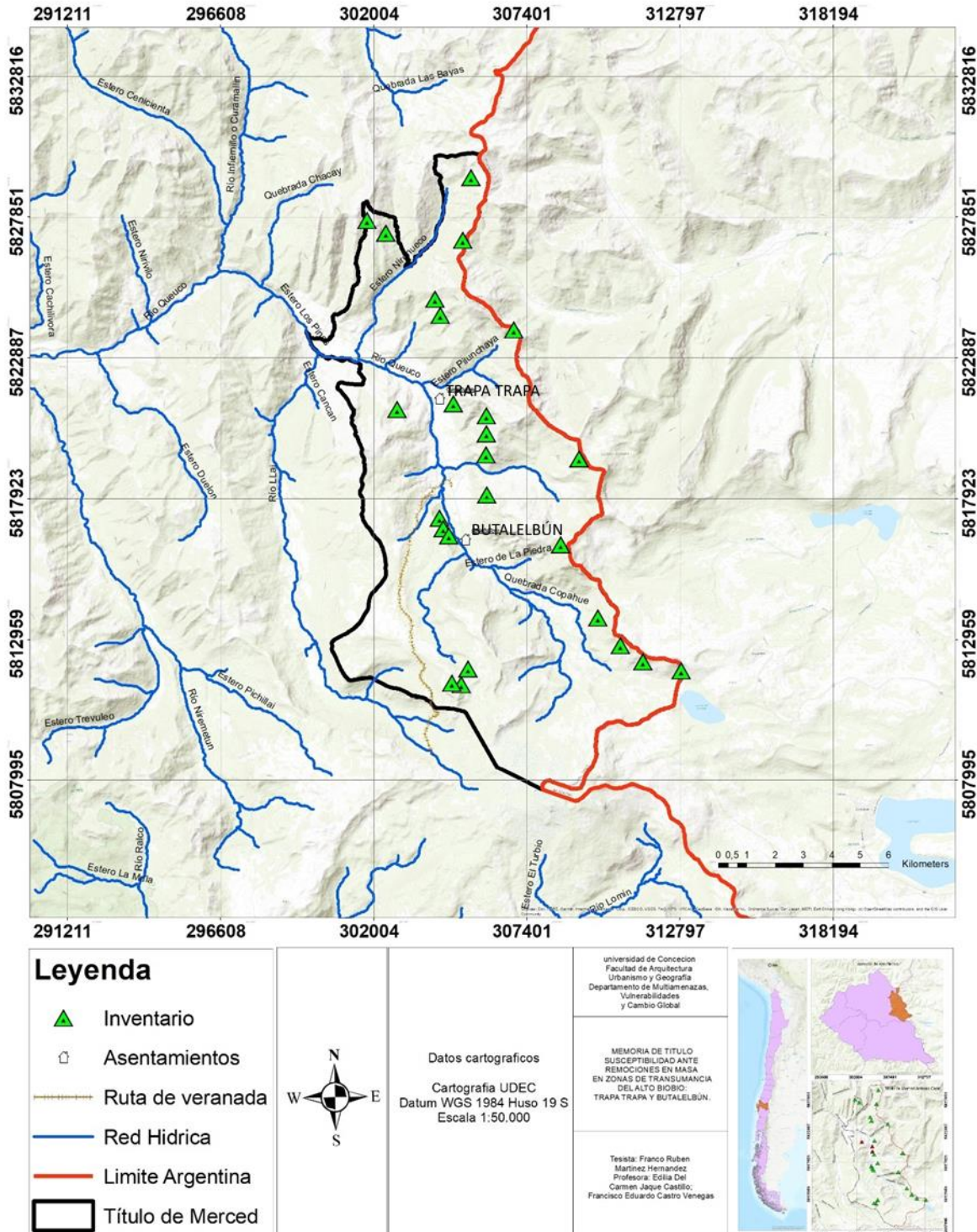
La zona de estudio es el sector del Título de Merced, ubicado en la comuna de Alto Biobío, Región del Biobío, se inserta en un entorno de montaña propio de la Cordillera de los Andes del sur de Chile, Su localización se caracteriza por una marcada influencia cordillerana, con fuertes pendientes, presencia de valles fluviales encajonado. Desde el punto de vista geográfico, el área corresponde a una zona de frontera interior, con baja densidad poblacional y un uso del suelo predominantemente silvo-pastoral, asociado a las prácticas de trashumancia de las comunidades Pehuenche. Un aspecto clave del territorio son Laderas de fuerte pendiente: constituyen gran parte de la superficie del área, con valores superiores al 30° de inclinación, lo que favorece la ocurrencia de deslizamientos, flujos de detritos y caídas de rocas. Las laderas suelen estar cubiertas por suelos delgados y poco desarrollados, que, en combinación con precipitaciones intensas y pérdida de cobertura vegetal, se transforman en factores condicionantes clave para la inestabilidad.

El inventario de remociones en masa desarrollado en el sector del Título de Merced de Trapa Trapa y Butalelbún (figura 5), en la comuna de Alto Biobío, tuvo como propósito principal apoyar el análisis de susceptibilidad en un territorio de montaña caracterizado por fuertes pendientes, procesos geomorfológicos activos y una estrecha relación con la práctica de la trashumancia pehuenche, que constituye un elemento identitario y funcional en la organización territorial de la comunidad. La delimitación del área de estudio se realizó considerando los límites territoriales del Título de Merced, reconociendo su importancia histórica y cultural como unidad de ocupación y uso del espacio. El análisis se desarrolló bajo una escala cartográfica de 1:50.000, lo que permitió identificar y registrar eventos de carácter general y patrones espaciales de susceptibilidad, aunque sin alcanzar un mayor nivel de detalle, propio de escalas mayores, lo cual es coherente con el enfoque exploratorio y de apoyo metodológico que persigue el presente trabajo.

La importancia de contar con un inventario de remociones en masa en este contexto radica en que constituye la piedra angular para la evaluación de susceptibilidad del territorio, sirviendo como insumo fundamental para la elaboración de mapas temáticos y análisis comparativos entre factores condicionantes y desencadenantes. Dicho inventario no solo permite identificar la localización y características básicas de los eventos, sino también generar una base sistematizada que facilite la incorporación de información en modelos de gestión territorial, en los cuales la vulnerabilidad de las comunidades trashumantes se ve estrechamente vinculada a las dinámicas geomorfológicas del entorno. En este sentido, disponer de un inventario permite trascender el mero registro descriptivo, proyectando aplicaciones en la planificación del uso del suelo, la mitigación de riesgos y la definición de zonas críticas en la movilidad trashumante. La metodología aplicada se sustentó en técnicas de fotointerpretación, apoyándose en la complementariedad entre fuentes secundarias y observación directa. Como insumos principales se utilizaron imágenes satelitales de Google Earth y fotografías de terreno capturadas con cámara digital, las cuales fueron analizadas de manera integrada para reforzar la validez de las observaciones.

La fotointerpretación permitió reconocer evidencias morfológicas directamente asociadas a procesos de remoción en masa, entre las que destacan cicatrices en laderas, zonas de arrastre y acumulación de material detrítico, colmatación parcial de cauces menores y cambios abruptos en la cobertura vegetal, que constituyen indicadores visuales de la ocurrencia de eventos pasados. El marco temporal del inventario se acotó al análisis de imágenes satelitales comprendidas entre los años 2016 y 2024, lo que otorgó la posibilidad de identificar variaciones en la dinámica de los procesos a lo largo de un período de casi una década. Este horizonte temporal resulta relevante, ya que permite observar la recurrencia de los fenómenos, diferenciar entre eventos antiguos y más recientes, y valorar la relación entre la frecuencia de ocurrencia y los factores ambientales condicionantes.

Figura 5. Mapa de inventario de remoción en masa.



Fuente: Elaboración propia 2025

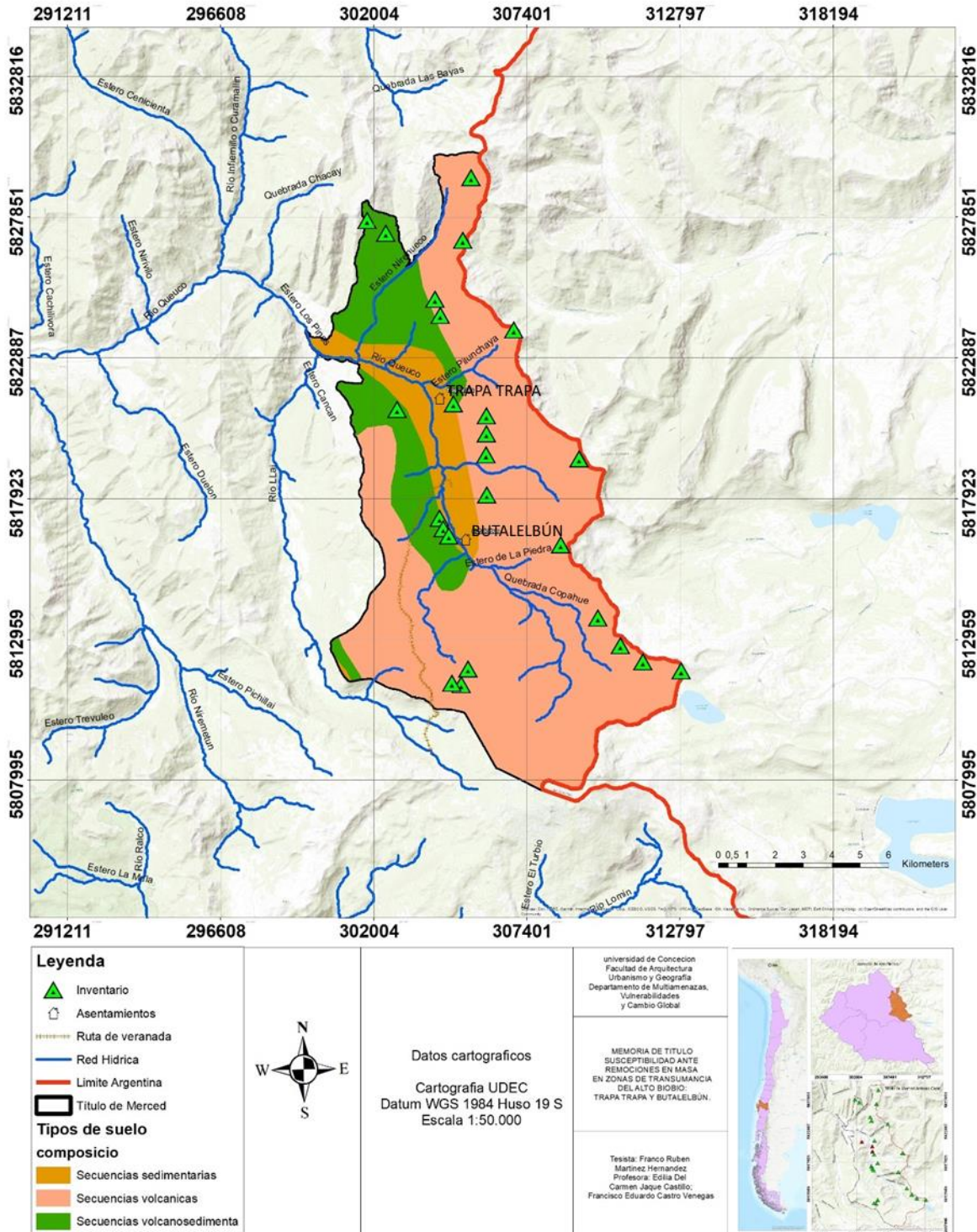
4.2 Factores condicionantes de las remociones en masa.

4.2.1 Geología

Los depósitos sedimentarios presentes en los sectores bajos y de valle del Título de Merced Antonio Canio se asocian generalmente a relieves de menor pendiente y a la presencia de suelos más desarrollados, con mayor espesor y contenido fino. Estos suelos pueden presentar una aparente estabilidad en condiciones secas; sin embargo, bajo escenarios de saturación hídrica y cobertura vegetal reducida, tienden a perder cohesión y resistencia al corte, transformándose en elementos susceptibles a procesos de remoción en masa.

Esta transición litológica (sedimentario → volcánico-sedimentario → volcánico) es relevante para la evaluación de susceptibilidad a remociones en masa, ya que cada cambio implica variaciones en la cohesión, permeabilidad, espesor del suelo y antecedentes de inestabilidad. Por lo tanto, en el análisis de susceptibilidad que desarrolla esta investigación, se incorpora una capa litológica diferenciada, asignando valores de ponderación distintos según esta jerarquía, lo cual permite una discriminación más fina de las zonas críticas dentro del área de estudio. En la figura 6 se puede ver la distribución geológica del Título de Merced Antonio Canio.

Figura 6. Mapa geológico.



Fuente: Sernageomin 2025

4.2.2 Geomorfología

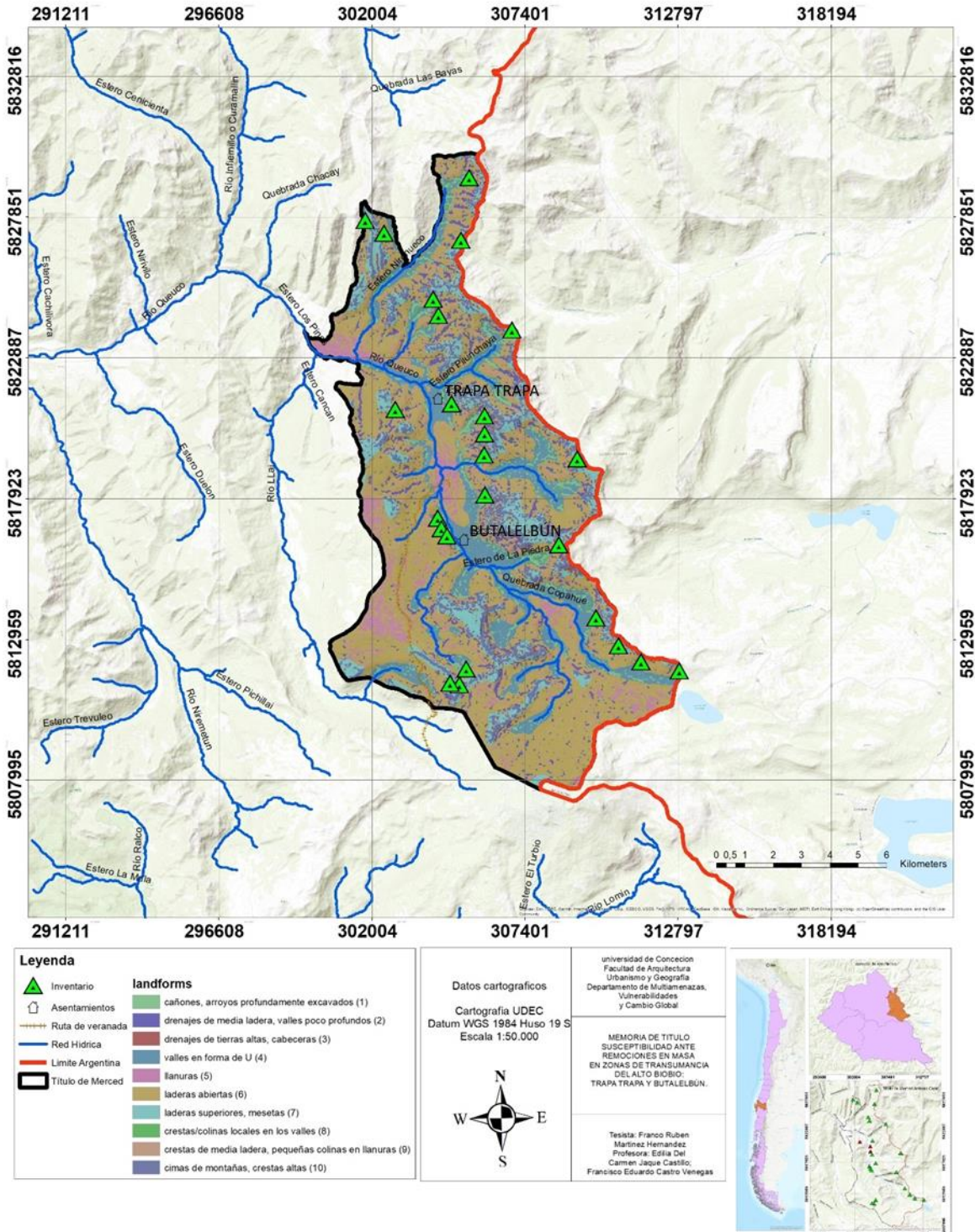
Como se puede ver en la figura 8 hay una gran presencia de estratos volcánicos y geoformas provenientes de estos, como son los casos de.

- Las colas de lava no diferenciadas tienden a conformar relieves abruptos y laderas rectas, susceptibles a la meteorización mecánica y desprendimiento de bloques.
- Los depósitos compuestos estratificados (probablemente mezcla de caída piroclástica y remociones antiguas) conforman laderas intermedias que presentan inestabilidad cuando son expuestas por erosión fluvial.

Estas unidades, localizadas mayormente en la franja central del mapa y hacia el sector sur, representan zonas críticas para la susceptibilidad, pues combinan materiales heterogéneos y pendientes medias a altas. Se identifican terrazas fluviales en distintos niveles (I, II, III), así como valles glaciares. Constituyen superficies relativamente estables, con pendientes suaves. Sin embargo, las terrazas más bajas presentan erosión, lo que puede inducir deslizamientos en sectores donde las unidades coluviales colindan con el cauce.

Como se puede ver en la figura 7 y siguiendo las categorías de un TPI Landform según (Weiss, 2001) la mayor concentración de remociones en masa se observa principalmente en unidades correspondientes a laderas abiertas, drenajes de media ladera y cabeceras, así como en zonas de transición entre valles y laderas, donde convergen pendientes moderadas a fuertes, procesos de incisión fluvial y acumulación de materiales coluviales. En contraste, las unidades de fondo de valle y planicies presentan una menor densidad de eventos, lo que sugiere condiciones relativamente más estables desde el punto de vista geomorfológico. Esta relación espacial evidencia que la posición topográfica y la forma del relieve constituyen factores condicionantes relevantes en la ocurrencia de remociones en masa, ya que influyen directamente en la concentración de escorrentía, la saturación de suelos y la generación de planos de debilidad.

Figura 7. Mapa de TPI Landforms (Topographic Position Index)



Fuente: Universidad de Concepción 2025

La geomorfología del terreno exhibe amplias extensiones de depósitos coluviales ubicados principalmente en las laderas medias y bajas de la cuenca. Estas acumulaciones, representadas en tonos rosados y lilas, corresponden a materiales heterogéneos provenientes de procesos gravitacionales prolongados y de remociones en masa ocurridas en distintos momentos del pasado geomorfológico. Su presencia constituye un indicador directo de inestabilidad recurrente, ya que los coluviones suelen desarrollarse en pendientes superiores al 25°, lo cual favorece la movilización de sedimentos ante incrementos en la humedad, eventos de lluvia intensa o socavación fluvial. A ello se suma la identificación de escarpes de remoción en masa, los cuales evidencian la ocurrencia de movimientos gravitacionales antiguos o recientes. Estos escarpes reflejan zonas donde el talud ha cedido y podría seguir evolucionando, especialmente en áreas donde confluyen aguas superficiales o existe infiltración que incrementa la carga hídrica del suelo.

4.2.3 Modelo de elevación del terreno.

El mapa de altitudes elaborado para el sector del Título de Merced Antonio Canio permite identificar una organización altitudinal que aporta información geomorfológica clave para el análisis de la susceptibilidad a procesos de remoción en masa. Como se observa en la Figura 9, las zonas de menor altitud, representadas en tonos verdes ($\approx 900\text{--}1.340$ m.s.n.m.), corresponden principalmente a valles y fondos de quebradas, espacios donde se localiza el asentamiento permanente de la comunidad. Estas unidades topográficas presentan pendientes relativamente menores y concentran las principales áreas de uso habitacional y productivo.

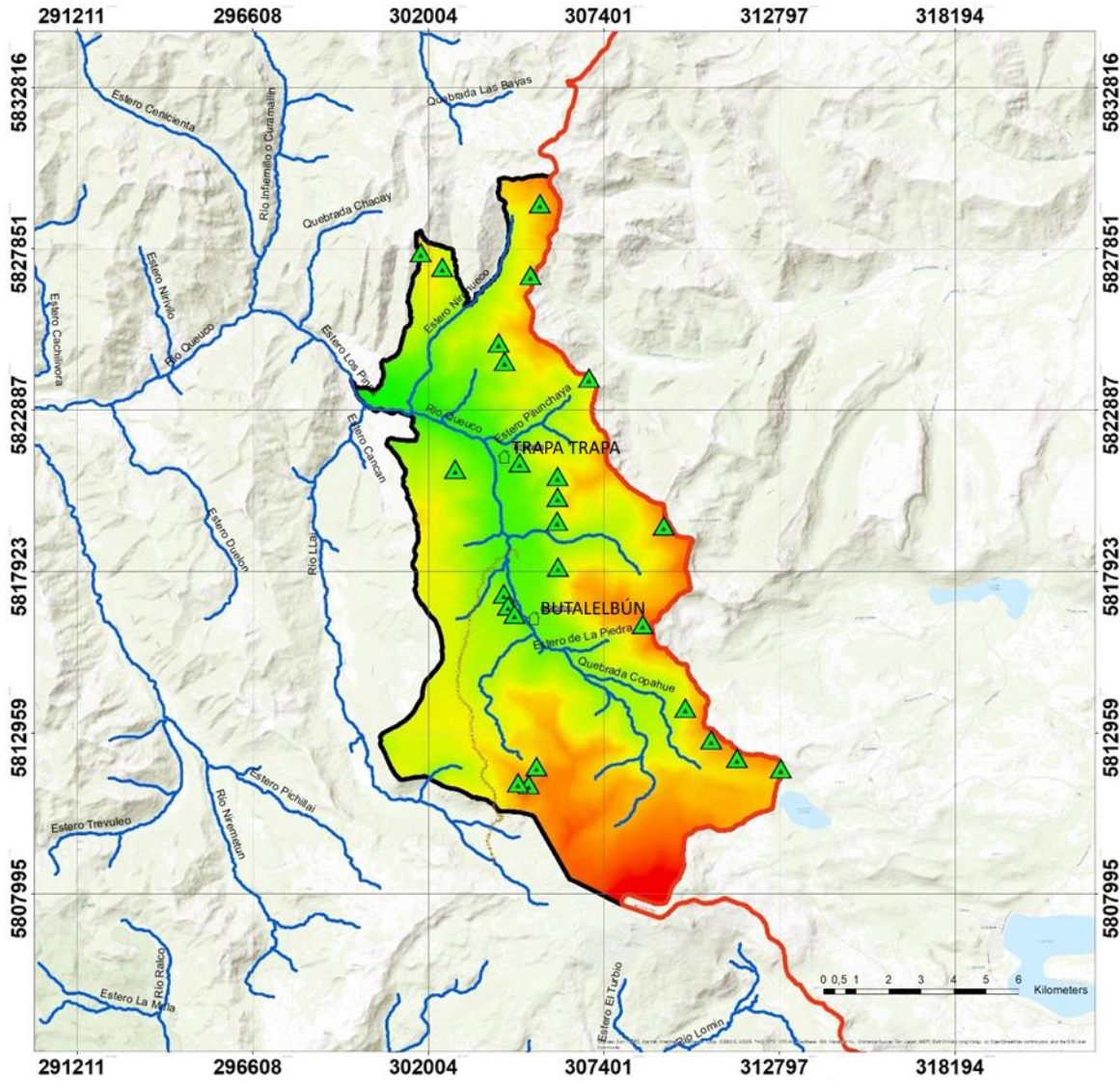
En contraste, hacia cotas superiores se aprecia una transición progresiva hacia tonos amarillos, naranjas y rojos ($\approx 1.780\text{--}3.100$ m.s.n.m.), que representan laderas escarpadas y sectores montañosos de alta elevación. Estas áreas constituyen el entorno inmediato de movilidad territorial de la comunidad, particularmente asociado a la práctica de la trashumancia estacional. En el contexto del Título de Merced, las zonas de mayor altitud concentran una serie de condiciones críticas desde el punto de vista geomorfológico: pendientes más pronunciadas, menor espesor de suelo, cobertura vegetal potencialmente discontinua y una mayor exposición a procesos de meteorización física, escorrentía superficial y deshielo. Este conjunto de factores configura un escenario favorable para la inestabilidad de laderas, coherente con lo señalado por la literatura, que destaca que la combinación de taludes empinados y elevadas cotas altitudinales incrementa significativamente la probabilidad de fallas gravitacionales (Sepúlveda et al., 2011).

Adicionalmente, el modelo altitudinal evidencia la presencia de redes de escorrentía que descienden desde las áreas de mayor elevación hacia los valles donde se emplaza el asentamiento habitual. La concentración de estos cursos de agua favorece procesos de socavación en la base de los taludes, lo que, en combinación con el alta pendiente y las condiciones altitudinales, puede actuar como factor detonante de deslizamientos y flujos de detritos. En este sentido, la altitud no opera

de manera aislada, sino como un factor condicionante que integra e intensifica la acción de otras variables relevantes, tales como la pendiente, la cobertura vegetal, el espesor del suelo, la climatología local (precipitaciones líquidas y sólidas, deshielo) y la estructura geológica.

En territorios cordilleranos como el Alto Biobío, las mayores altitudes se asocian además a un régimen climático más severo, caracterizado por precipitaciones significativas en forma de nieve, ciclos recurrentes de congelamiento–deshielo y la presencia de procesos periglaciales. Estas dinámicas contribuyen al debilitamiento progresivo de la cohesión de suelos y rocas, amplificando la susceptibilidad a remociones en masa y reforzando el rol de la altitud como variable clave en la configuración del peligro geomorfológico (Fan et al., 2022).

Figura 9. Mapa Topográfico.



<p>Leyenda</p> <ul style="list-style-type: none"> ▲ Inventario Asentamientos Ruta de veranada Red Hidrica Limite Argentina Título de Merced <p>Elevacion MSNM High : 3013 Low : 930</p>		<p>Datos cartograficos Cartografia UDEC Datum WGS 1984 Huso 19 S Escala 1:50.000</p>	<p>universidad de Concepcion Facultad de Arquitectura Urbanismo y Geografia Departamento de Multiamenazas, Vulnerabilidades y Cambio Global</p> <p>MEMORIA DE TITULO SUSCEPTIBILIDAD ANTE REMOCIONES EN MASA EN ZONAS DE TRANSUMANCIA DEL ALTO BIOBIO: TRAPA TRAPA Y BUTALEBÚN.</p> <p>Tesista: Franco Ruben Martinez Hernandez Profesora: Edilia Del Carmen Jaque Castillo; Francisco Eduardo Castro Venegas</p>	
--	--	--	---	--

Fuente: Ministerio de medioambiente 2025

4.2.4 Pendientes como factor desencadenante

Como parte integral del proceso de remoción en masa se encuentran las pendientes y su grado de inclinación sobre el terreno, ya que este factor geomorfológico constituye uno de los condicionantes más determinantes en la inestabilidad de las laderas. El Título de Merced se ubica en un sector cordillerano de la Región del Biobío, caracterizado por un relieve abrupto y una topografía altamente disectada, lo cual se traduce en la presencia recurrente de pendientes de gran inclinación. Estas características geomorfológicas, sumadas a la limitada cobertura vegetal en varios sectores y a la acción constante de agentes erosivos, incrementan la probabilidad de ocurrencia de eventos de remoción en masa, en especial deslizamientos y caídas de rocas. La inclinación del terreno actúa directamente sobre la fuerza de gravedad que ejerce presión sobre los materiales, de manera que, a mayor pendiente, mayor es la probabilidad de que el equilibrio del talud se vea alterado. En este sentido, el análisis de las pendientes no solo permite identificar áreas críticas, sino también establecer relaciones entre la morfología del relieve, los procesos hidrológicos y la susceptibilidad frente a distintos tipos de remoción. Cabe destacar que la clasificación de pendientes es un paso metodológico clave dentro de cualquier análisis de susceptibilidad, ya que entrega parámetros objetivos y comparables para el diagnóstico territorial.

Tabla 2: Distribución porcentual de la superficie según rangos de pendiente.

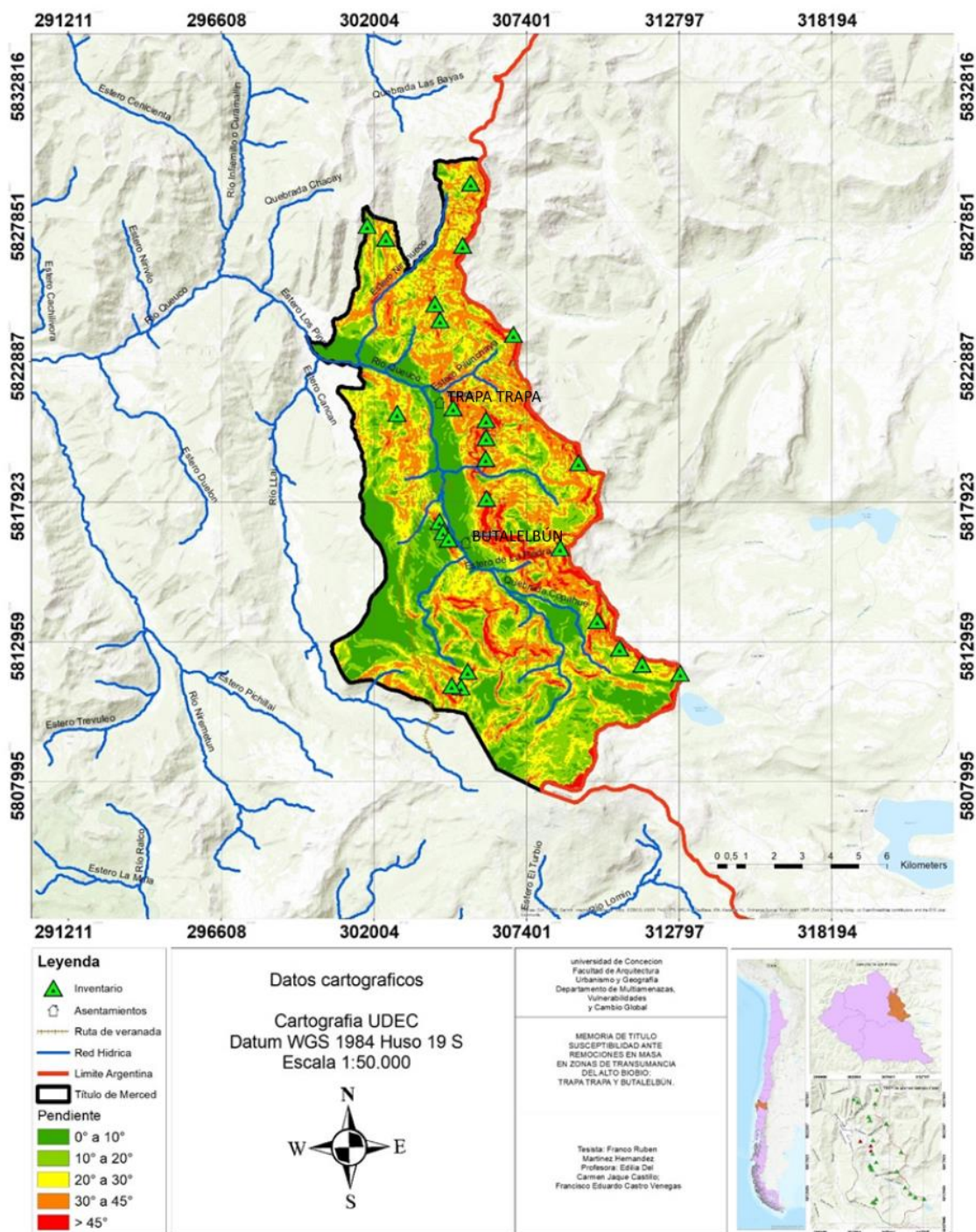
Rangos de Pendiente (°)	Superficie en (%)
0° a 10°	19,58%
10° a 20°	24,97%
20° a 30°	26,59%
30° a 45°	24,47%
> 45°	4,39%

Fuente: Elaboración propia 2025

Como se puede apreciar en la figura 10, una parte considerable del Título de Merced se encuentra dentro de un rango de pendiente muy pronunciada, esto juntando los rangos de 30° a 45° y >45° de pendiente da un 28,86%. Los rangos usados para

medir la pendiente y el porcentaje del área que abarcan dichos rangos se pueden observar en la tabla 2.

Figura 10. Mapa de rangos de pendiente en grados.



Fuente: Elaboración propia 2025

4.2.5 Curvatura del Título de Merced Antonio Canio

El mapa de curvatura del área correspondiente al Título de Merced Antonio Canio, en la comuna de Alto Biobío, permite identificar con mayor detalle las variaciones morfológicas del relieve y comprender la dinámica de los procesos superficiales que operan en el territorio. La curvatura expresa la tasa de cambio de la pendiente en cada punto del terreno, permitiendo distinguir superficies convexas y cóncavas, las cuales cumplen un rol fundamental en la concentración o dispersión del flujo de agua y materiales.

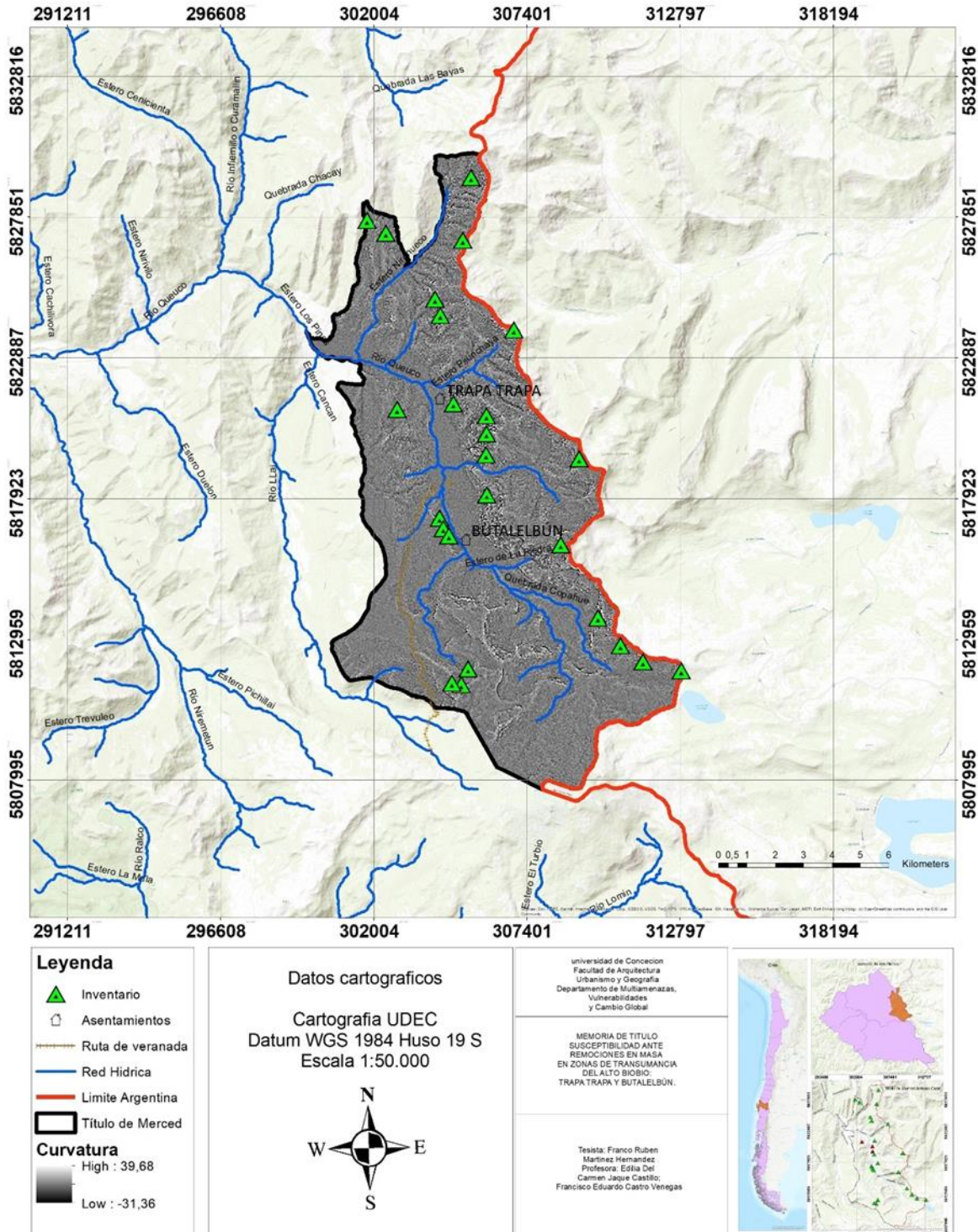
Los valores positivos de curvatura representan superficies convexas, tales como crestas, lomajes y cumbres, donde el escurrimiento superficial tiende a divergir y el material a dispersarse. En contraste, los valores negativos corresponden a superficies cóncavas, generalmente asociadas a quebradas, cauces y depresiones topográficas, que favorecen la convergencia del flujo hídrico y la acumulación de sedimentos. Tal como se observa en la Figura 11, el rango de valores de curvatura obtenido para el área de estudio evidencia una marcada heterogeneidad morfológica, reflejo de la complejidad geomorfológica del territorio.

Las zonas con curvatura negativa se concentran principalmente en torno a la red hidrográfica del río Queuco y sus afluentes, identificando sectores de acumulación donde el escurrimiento superficial es más intenso. Estas áreas presentan una mayor propensión a procesos de erosión, saturación del suelo y activación de movimientos en masa, especialmente flujos de detritos y deslizamientos superficiales, debido a la combinación de convergencia de flujos, pendientes locales y condiciones hidrológicas favorables.

Por su parte, las áreas con valores positivos de curvatura, localizadas en las divisorias de aguas y en sectores de mayor altitud hacia el oriente, corresponden a morfologías convexas con un drenaje relativamente más eficiente. No obstante, en estos sectores también pueden desarrollarse procesos de inestabilidad asociados a la pérdida de soporte lateral, erosión regresiva y desmantelamiento de laderas, particularmente en pendientes pronunciadas.

El patrón espacial general de la curvatura refleja una morfología fuertemente condicionada por la estructura geológica y el origen volcánico-sedimentario del territorio. En las zonas altas del sector oriental, próximas al volcán Copahue, predominan pendientes abruptas y una curvatura altamente variable, lo que sugiere la presencia de relieves relativamente jóvenes, compuestos por materiales poco consolidados y, por ende, potencialmente inestables. En contraste, hacia el sector occidental, el relieve se torna más suave y continuo, con formas de mayor amplitud, donde las concavidades se asocian principalmente al encajamiento progresivo de la red fluvial en depósitos sedimentarios más antiguos.

Figura 11. Mapa de curvatura de laderas.



Fuente: Elaboración propia 2025

4.2.6 Orientación de laderas.

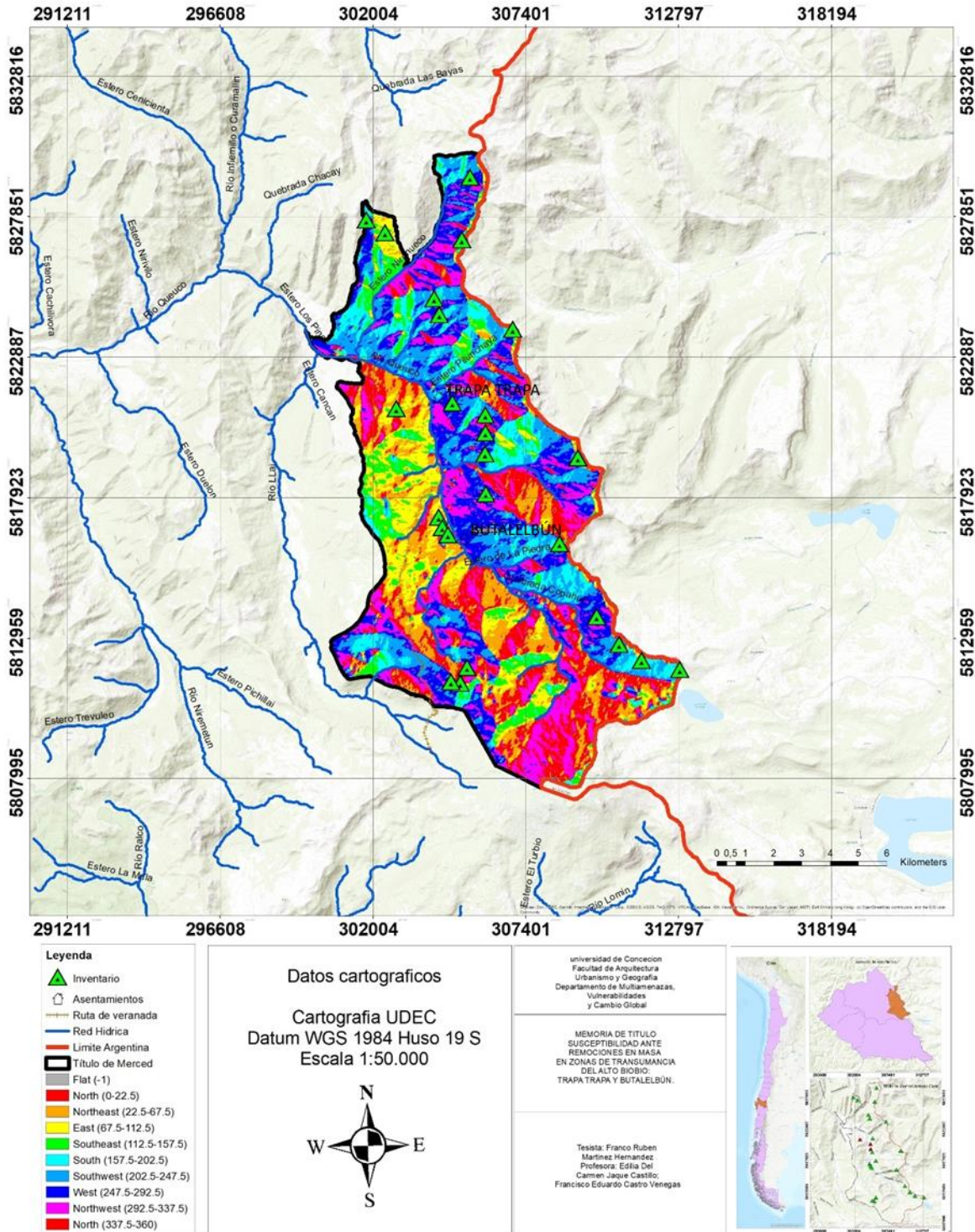
El mapa de orientación de pendientes del Título de Merced Antonio Canio permite identificar la dirección predominante hacia la cual se inclinan las laderas del terreno, información esencial para comprender la dinámica geomorfológica del área y su relación con los procesos de remoción en masa. Este tipo de análisis se basa en la interpretación del Modelo Digital de Elevación (DEM), donde se clasifican las superficies según el ángulo de exposición respecto al norte geográfico, expresado en grados azimutales. En el caso del territorio analizado, las orientaciones predominantes se distribuyen principalmente hacia el norte, noreste, sur y suroeste, con variaciones locales asociadas a los valles fluviales y a la morfología montañosa del entorno cordillerano.

Como se puede ver en la figura 12, el predominio de laderas orientadas al norte y noreste implica una mayor exposición a la radiación solar, lo que genera condiciones de menor humedad superficial y vegetación más dispersa, factores que pueden reducir la cohesión del suelo y aumentar la susceptibilidad a procesos erosivos y de remoción superficial. En contraste, las laderas orientadas al sur y suroeste tienden a presentar menor radiación solar directa, mayor retención de humedad y, en algunos casos, acumulación de material coluvial, lo que puede incrementar la probabilidad de inestabilidad por saturación hídrica, especialmente durante eventos de lluvia intensa o deshielo. Esta diferencia entre exposiciones resulta fundamental para la interpretación de la susceptibilidad del terreno. Asimismo, el mapa evidencia que los fondos de valle y cauces principales, como los del Río Queuco presentan orientaciones variables debido al encajonamiento del relieve, generando zonas de transición entre exposiciones opuestas.

Estas áreas son especialmente importantes, ya que pueden funcionar como corredores naturales de escorrentía y acumulación de sedimentos, lo que las vuelve potencialmente vulnerables ante flujos de detritos o deslizamientos de ladera provenientes de cotas más altas. El análisis espacial también permite observar que las zonas con orientación sureste y este, situadas principalmente hacia las cotas

más elevadas del territorio, se asocian a las vertientes del volcán Copahue y sectores altos de la cordillera, donde el modelado glaciar y volcánico ha generado relieves abruptos y pendientes pronunciadas. Estas áreas, por su alta energía del relieve, concentran condiciones geomorfológicas que pueden favorecer procesos de remoción gravitacional.

Figura 12. Mapa de orientación de laderas.



Fuente: Elaboración propia 2025

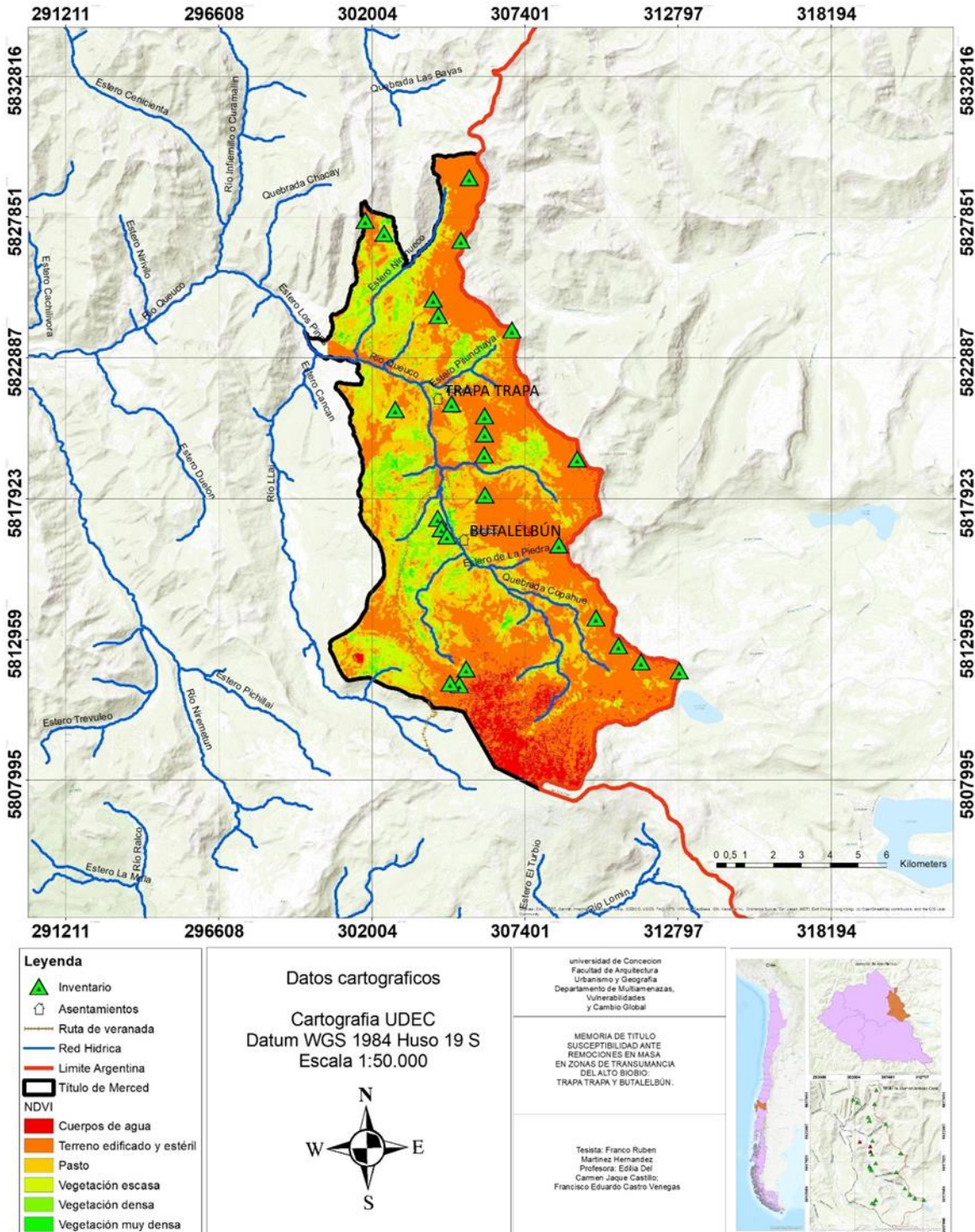
4.2.7 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Como se observa en la Figura 13, en el área correspondiente al Título de Merced Antonio Canio se reconoce una clara relación espacial entre la distribución de las remociones en masa inventariadas y las condiciones de cobertura vegetal, representadas mediante el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). La clasificación del NDVI distingue cinco categorías principales, que abarcan desde cuerpos de agua y superficies sin cobertura vegetal hasta sectores con vegetación densa y muy densa, lo que permite evaluar el rol de la vegetación como factor condicionante de la estabilidad de laderas.

Las remociones en masa se concentran preferentemente en sectores caracterizados por cobertura vegetal escasa a moderada, representados por las clases intermedias del NDVI. Estos sectores se localizan principalmente en laderas y fondos de valle asociados a la red hidrográfica principal, lo que sugiere una interacción significativa entre baja cobertura vegetal, procesos de saturación hídrica y dinámica fluvial. La recurrencia de remociones en proximidad a esteros y quebradas indica que la erosión basal y el incremento del contenido de humedad del suelo desempeñan un rol relevante en la generación de condiciones de inestabilidad.

En contraste, las áreas clasificadas con vegetación densa y muy densa presentan una menor frecuencia de remociones registradas, lo que refuerza el rol estabilizador de la cobertura vegetal, particularmente a través del refuerzo radicular, la protección del suelo frente a la erosión y la reducción de la escorrentía superficial. No obstante, estas zonas no se encuentran completamente exentas de procesos de remoción en masa, lo que sugiere que, bajo condiciones geomorfológicas desfavorables o frente a eventos detonantes de alta intensidad, la presencia de vegetación por sí sola no es suficiente para garantizar la estabilidad del terreno.

Figura 13. Mapa de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.



Fuente: Elaboración propia 2025

4.3 Análisis de susceptibilidad

El mapa de susceptibilidad a remociones en masa (RM) del Título de Merced Antonio Canio permite identificar de manera clara y sistemática la distribución espacial de los distintos niveles de propensión a la ocurrencia de estos procesos dentro del territorio. Como se observa en la Figura 14, la zonificación en cinco clases (muy baja, baja, moderada, alta y muy alta) sintetiza la interacción de los factores condicionantes incorporados en el modelo, integrando variables geomorfológicas, hidrológicas, topográficas y de cobertura del suelo. Esta representación espacial facilita la identificación de patrones consistentes de inestabilidad y su relación directa con la morfología del relieve, la red hidrográfica y la localización de los eventos de remoción en masa inventariados.

Las zonas clasificadas con susceptibilidad muy alta se localizan preferentemente en cabeceras de cuenca, laderas de fuerte pendiente y sectores próximos a la red hídrica, donde la convergencia del escurrimiento superficial favorece la saturación de los materiales y el desarrollo de planos de debilidad en suelos y depósitos poco consolidados. En contraste, las áreas con susceptibilidad baja y muy baja se concentran principalmente en sectores de menor pendiente y mayor continuidad superficial, asociados a fondos de valle y laderas suavizadas, donde predominan condiciones geomorfológicas relativamente más estables y una menor energía del relieve.

La distribución espacial del inventario de remociones en masa evidencia una clara tendencia a concentrarse en zonas clasificadas como de susceptibilidad moderada y alta, lo que valida de manera preliminar la capacidad del modelo para discriminar adecuadamente los sectores más propensos a la ocurrencia de estos procesos. No obstante, la presencia puntual de eventos en áreas clasificadas con menor susceptibilidad sugiere la influencia de factores desencadenantes específicos, tales como intervenciones antrópicas localizadas, modificaciones en la cobertura vegetal o variaciones locales en las propiedades físicas e hidrológicas del suelo, que no siempre son capturadas plenamente por el modelo.

Desde una perspectiva territorial, el patrón espacial de la susceptibilidad adquiere especial relevancia al considerar que una proporción significativa de las zonas clasificadas con susceptibilidad alta y muy alta coincide con áreas de tránsito y uso tradicional vinculadas a la trashumancia, así como con corredores naturales definidos por la red hidrográfica. En este sentido, el mapa de susceptibilidad no solo permite identificar sectores geomorfológicamente inestables, sino que constituye una herramienta clave para la planificación territorial y la gestión del riesgo, al evidenciar áreas donde la interacción entre procesos naturales y prácticas socio-territoriales incrementa la exposición y vulnerabilidad frente a remociones en masa.

Tabla 3. Rangos de susceptibilidad e información espacial.

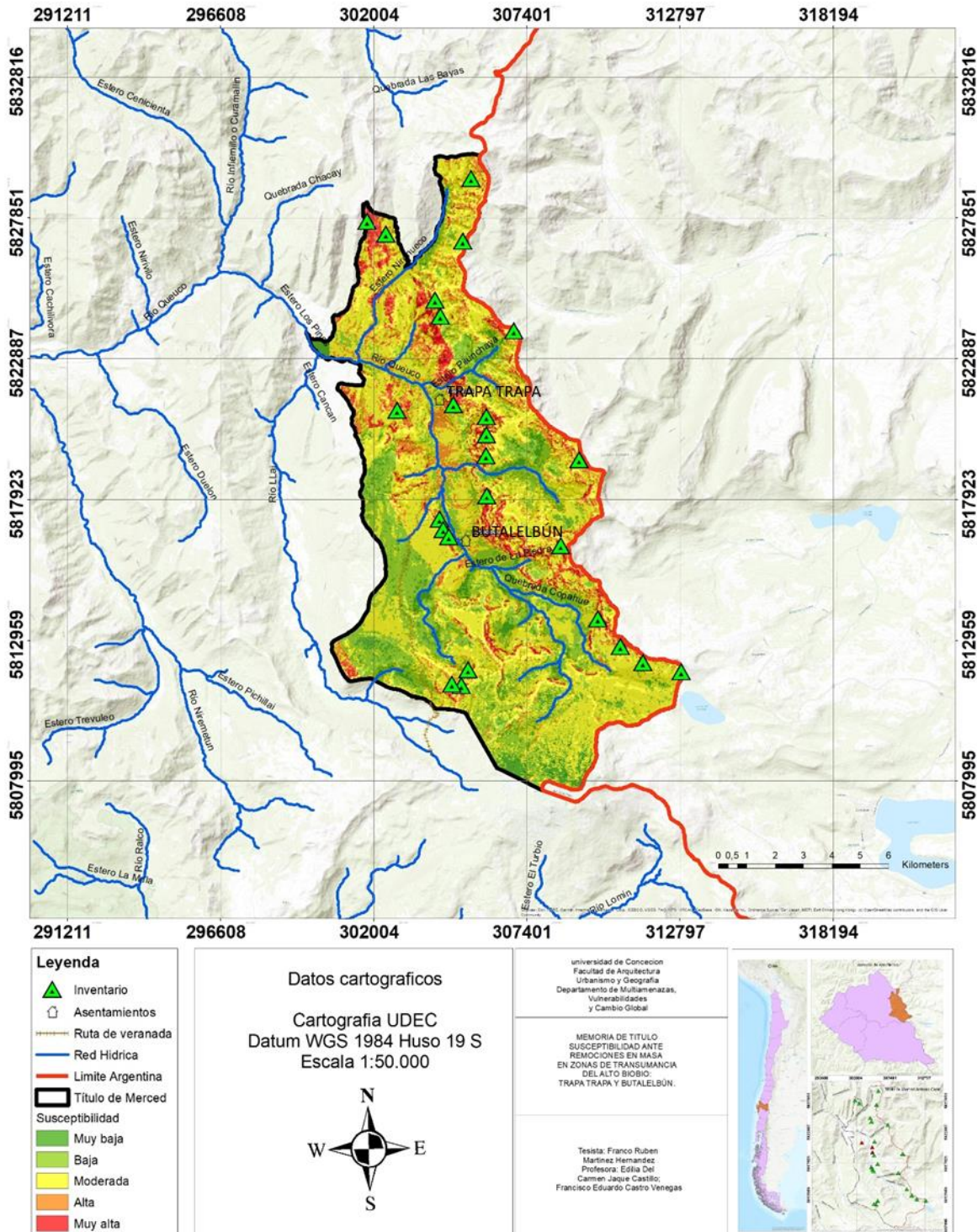
Clase de susceptibilidad	Superficie (ha)	Superficie (km²)	Porcentaje del territorio (%)	Observaciones territoriales
Muy baja	636	6	4,38%	Fondos de valle, pendientes suaves
Baja	3189	32	23,36%	Laderas suavizadas, mayor continuidad superficial
Moderada	7421	74	54,01%	Transición valle-ladera, cercanía a red hídrica secundaria
Alta	1490	15	10,95%	Laderas abruptas, convergencia de escorrentía
Muy alta	965	10	7.3%	Cabeceras de cuenca, quebradas activas
Total	13701	137	100 %	

Adicionalmente, el análisis del Predictive Rate (PR) presentado en la Tabla 4 permite evaluar el impacto relativo y la importancia de los distintos factores condicionantes incorporados en el modelo de susceptibilidad. Los resultados indican que aquellas variables que presentan valores de PR superiores a 2 particularmente la geología, la pendiente y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) corresponden a los factores con mayor capacidad explicativa y predictiva, evidenciando una relación más fuerte con la ocurrencia de remociones en masa

dentro del área de estudio. Esto confirma que las características litológicas, las condiciones morfométricas asociadas a pendientes más pronunciadas y el grado de cobertura vegetal desempeñan un rol determinante en la distribución espacial de los procesos de inestabilidad de laderas.

Por el contrario, variables como la curvatura y la topografía presentan valores de PR cercanos o iguales a 1, lo que indica una influencia limitada en el desempeño global del modelo y una menor capacidad para discriminar entre zonas con y sin eventos registrados. Este comportamiento sugiere que, a la escala de análisis utilizada, dichas variables aportan información complementaria al modelo, pero no constituyen factores determinantes por sí mismas en la susceptibilidad a remociones en masa. En conjunto, el análisis del PR permite jerarquizar los factores condicionantes y respalda tanto la selección de variables más influyentes como la coherencia interna del modelo de susceptibilidad aplicado al Título de Merced Antonio Canio.

Figura 14. Mapa de susceptibilidad de remoción en masa.



Fuente: Elaboración propia 2025

4.4 Validación de los resultados

La validación del modelo de susceptibilidad a remociones en masa se realizó mediante el análisis de la curva ROC (Receiver Operating Characteristic), obteniéndose un valor de área bajo la curva (AUC) de 0,85, tal como se observa en la Figura 15. Este resultado indica una capacidad predictiva buena, considerando que valores de AUC entre 0,7 y 0,8 corresponden a modelos con desempeño moderado a bueno, y valores superiores a 0,8 reflejan una adecuada capacidad de discriminación. En este sentido, el modelo supera ampliamente la línea de referencia asociada a un comportamiento aleatorio (AUC = 0,5), lo que confirma su utilidad para identificar zonas con distinta propensión a la ocurrencia de remociones en masa.

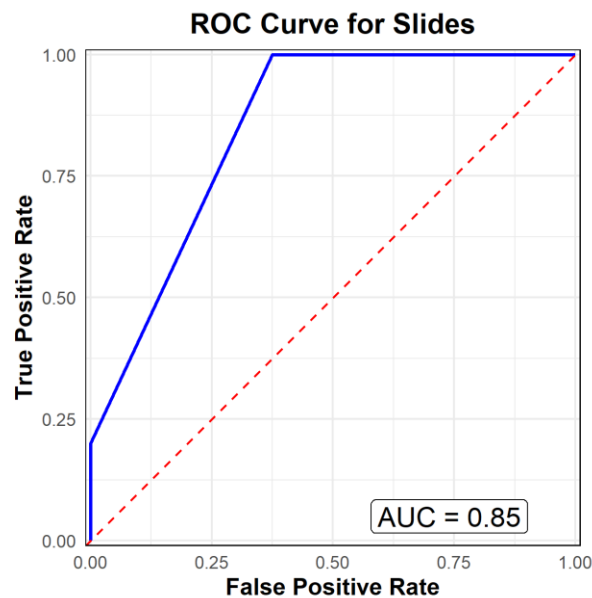
El análisis se construyó a partir de un inventario compuesto por 25 puntos de remociones en masa, el cual fue dividido en un conjunto de entrenamiento (70 %) y un conjunto de validación o prueba (30 %). Para este último, se generó una capa de puntos de no remoción equivalente en número al conjunto de prueba, los cuales fueron distribuidos espacialmente sobre el mapa de susceptibilidad previamente elaborado. Dicho mapa clasifica la susceptibilidad en una escala ordinal de cinco categorías, que varían desde 1 (muy baja) hasta 5 (muy alta), permitiendo evaluar la capacidad del modelo para asignar valores más altos de susceptibilidad a los sectores donde efectivamente se han registrado eventos.

Con el fin de evitar solapamientos espaciales entre los puntos de remoción y no remoción, y reducir sesgos asociados a la autocorrelación espacial, los puntos de no remoción fueron generados considerando un buffer de 215 metros respecto de los eventos inventariados. Este umbral fue definido a partir del área aproximada de las remociones identificadas en la zona de estudio, garantizando una separación espacial coherente con la escala del fenómeno analizado. Todo el procedimiento de validación fue implementado en el entorno RStudio, lo que permitió un control reproducible del proceso y una evaluación estadística consistente del desempeño del modelo.

La curva ROC resultante evidencia que, a medida que el umbral de clasificación se desplaza desde valores bajos hacia valores altos de susceptibilidad, la tasa de verdaderos positivos aumenta de manera más pronunciada que la tasa de falsos positivos. Este comportamiento indica que el modelo es capaz de identificar correctamente una proporción significativa de las áreas afectadas por remociones en masa. No obstante, también se observa la existencia de sectores clasificados con alta susceptibilidad donde no se registran eventos, lo que puede atribuirse a la naturaleza probabilística del modelo, a la limitada extensión temporal del inventario o a la ocurrencia de procesos aún no detonados.

En conjunto, los resultados de la validación mediante curva ROC respaldan la consistencia y el buen desempeño del modelo de susceptibilidad aplicado al Título de Merced Antonio Canio, al tiempo que ponen de relieve la necesidad de interpretar el mapa resultante como una herramienta de apoyo a la planificación territorial y la gestión del riesgo, más que como una predicción determinística de eventos futuros.

Figura 15. validación por curva ROC



Fuente: Elaboración propia 2026

V. DISCUSION DE LOS RESULTADOS

5.1 Inventario de remociones en masa

El inventario de remociones en masa elaborado para el Título de Merced Antonio Canio está compuesto por un total de 25 eventos identificados dentro de un área aproximada de 137 km². Desde una perspectiva cuantitativa, este número puede considerarse limitado en comparación con inventarios desarrollados en otros contextos territoriales. Sin embargo, su relevancia debe analizarse a la luz de las condiciones particulares del área de estudio, caracterizada por su localización cordillerana, baja densidad poblacional y escasa cobertura de información oficial sobre remociones en masa. En este sentido, resulta especialmente significativo que SERNAGEOMIN no disponga de registros sistematizados de remociones en masa para el Título de Merced Antonio Canio, lo que posiciona a este inventario como un insumo pionero y de alto valor tanto para futuros estudios científicos como para las propias comunidades locales. La comparación con el inventario desarrollado por Núñez (2025) permite evidenciar las profundas desigualdades territoriales en la disponibilidad de información y recursos para el estudio de remociones en masa dentro de una misma región. Dicho estudio abarca cuatro comunas del área metropolitana y costera del Biobío (Penco, Hualpén, Talcahuano y Tomé), con una superficie total de 752 km², y se sustenta en un contexto donde existe una mayor densidad urbana, infraestructura crítica y registros históricos consolidados en plataformas como GEOMIN. En ese marco, el inventario reporta un total de 471 eventos, con una marcada concentración en sectores costeros y urbanos, lo que refleja no solo una mayor ocurrencia potencial, sino también una mayor capacidad institucional para su detección, registro y sistematización.

De manera complementaria, el estudio de Gajardo (2025), que abarca un área cordillerana de aproximadamente 6.387 km², presenta un inventario de 55 remociones en masa. A pesar de cubrir una superficie más de 46 veces superior a la del Título de Merced Antonio Canio, el número de eventos registrados es relativamente bajo. Esta situación refuerza la hipótesis de que las zonas cordilleranas del Biobío presentan una subrepresentación significativa de

remociones en masa en los registros oficiales, más que una ausencia real de procesos. En consecuencia, el inventario elaborado en esta investigación adquiere especial relevancia al contribuir a reducir esta brecha de información y visibilizar procesos geomorfológicos activos en territorios históricamente marginados de los sistemas formales de monitoreo.

5.2 Mapa de susceptibilidad

El mapa de susceptibilidad a remociones en masa del Título de Merced Antonio Canio fue clasificado en cinco categorías (muy baja, baja, moderada, alta y muy alta), mostrando una distribución espacial que evidencia una elevada propensión del territorio a la ocurrencia de estos procesos. Los resultados indican que un 55 % del área presenta susceptibilidad moderada, mientras que un 17 % se concentra en los rangos alto y muy alto, lo que implica que más de dos tercios del territorio se encuentran en condiciones potencialmente favorables para la inestabilidad de laderas. Esta configuración refleja la influencia combinada de factores como la elevada altitud, pendientes pronunciadas, menor cobertura vegetal y una red hidrográfica activa, propios de un contexto cordillerano.

Al comparar estos resultados con el análisis de susceptibilidad desarrollado por Orellana (2025) para un conjunto de comunas del área continental y costera del Biobío (San Pedro de la Paz, Coronel, Lota y Santa Juana), se observa un contraste marcado. En dicho estudio, que abarca una superficie total de 1.258 km², predominan ampliamente las clases de susceptibilidad baja y muy baja, superando en conjunto el 45 % del territorio continental. Las categorías moderada, alta y muy alta aparecen como una fracción minoritaria, lo que evidencia un comportamiento geomorfológico significativamente distinto al observado en el Título de Merced Antonio Canio. No obstante, la Isla Santa María incluida en el estudio de Orellana presenta un patrón intermedio, donde las clases de susceptibilidad moderada a muy alta adquieren mayor presencia. Este comportamiento sugiere que factores como la topografía, la cobertura vegetal y la exposición a procesos erosivos desempeñan un rol clave en la configuración de la susceptibilidad, independientemente de la

localización continental o insular. En este sentido, las diferencias observadas refuerzan la importancia de considerar las particularidades geomorfológicas y ambientales de los territorios cordilleranos, donde la combinación de mayor elevación y menor cobertura vegetal, reflejada en valores más bajos de NDVI, incrementa significativamente la susceptibilidad a remociones en masa.

5.3 Valores AUC

El valor AUC obtenido a partir de la curva ROC para el modelo de susceptibilidad desarrollado en esta investigación es de 0,85, utilizando el método de tasa de frecuencia (FR). Este resultado indica una buena capacidad predictiva del modelo, incluso considerando el tamaño reducido del inventario de remociones en masa. La validación se realizó a partir de 17 puntos de entrenamiento, 8 puntos de prueba y 8 puntos de no remoción, empleando el mapa de susceptibilidad generado mediante el método FR, lo que permitió evaluar de manera objetiva la capacidad del modelo para discriminar entre zonas con y sin eventos registrados.

Al comparar este desempeño con los resultados obtenidos por Núñez (2025) y Orellana (2025), quienes también utilizaron el método FR y validaron sus modelos mediante curvas ROC con valores AUC superiores a 0,7, se observa que la confiabilidad del modelo desarrollado en esta tesis es comparable, a pesar de contar con un inventario considerablemente más limitado. Este resultado refuerza la consistencia metodológica del enfoque adoptado y su pertinencia para contextos territoriales con escasez de datos, como los sectores cordilleranos del Biobío. En conjunto, los resultados de la validación respaldan la utilidad del modelo de susceptibilidad como una herramienta robusta para el análisis espacial de remociones en masa, al tiempo que evidencian la necesidad de fortalecer los inventarios en zonas rurales y de montaña. Desde una perspectiva aplicada, el modelo constituye un insumo relevante para la planificación territorial y la gestión del riesgo, especialmente en territorios indígenas donde las prácticas socio-territoriales, como la trashumancia, interactúan de manera directa con procesos geomorfológicos activos.

VI. CONCLUSIONES

Las remociones en masa constituyen procesos geomorfológicos recurrentes tanto en áreas urbanas densamente pobladas como en zonas rurales y de baja ocupación humana. No obstante, existe una marcada disparidad en la disponibilidad de información, estudios sistemáticos e instrumentos de evaluación del riesgo entre ambos contextos territoriales. Esta brecha se traduce en una mayor vulnerabilidad para sectores alejados de los centros urbanos, donde la ausencia de registros oficiales y diagnósticos territoriales limita la comprensión de la amenaza y dificulta la gestión preventiva del riesgo. En este escenario, el Título de Merced Antonio Canio representa un caso paradigmático, al no contar con inventarios de remociones en masa en las bases de datos oficiales de SERNAGEOMIN, a pesar de presentar condiciones geomorfológicas que lo hacen altamente susceptible a este tipo de procesos.

En respuesta a esta carencia, la presente investigación se orientó a la construcción de un inventario de remociones en masa y a la elaboración de un modelo de susceptibilidad espacialmente explícito, generando insumos inéditos para el territorio. Estos productos no solo contribuyen al avance del conocimiento científico sobre los procesos de inestabilidad de laderas en contextos cordilleranos del Biobío, sino que también constituyen herramientas potencialmente útiles para las comunidades locales, en particular para quienes desarrollan prácticas de trashumancia, al permitir identificar sectores de mayor peligrosidad asociados a rutas de tránsito y uso tradicional del territorio.

El modelo de susceptibilidad fue desarrollado mediante el método de tasa de frecuencia (Frequency Ratio, FR), incorporando siete factores condicionantes: pendiente, orientación de laderas, curvatura, Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), geología, altitud y geomorfología. Si bien investigaciones previas, como la de Gajardo (2025), han abordado áreas geográficamente cercanas y han generado inventarios de remociones en masa, estas no integran un modelo FR ni una validación estadística mediante curva ROC, lo que dificulta

comparaciones directas en términos metodológicos. En este contexto, la presente investigación recurrió a estudios comparables que aplican el método FR y validaciones ROC, lo que permitió situar los resultados obtenidos dentro de un marco metodológico robusto y ampliamente utilizado en la literatura especializada.

La evaluación del modelo mediante la curva ROC arrojó un valor AUC de 0,85, lo que indica una buena capacidad predictiva y una adecuada discriminación entre zonas con y sin ocurrencia de remociones en masa. Este resultado resulta especialmente relevante considerando el tamaño limitado del inventario, y respalda la consistencia del enfoque metodológico adoptado para contextos territoriales con escasez de datos. En consecuencia, el modelo desarrollado puede considerarse confiable como herramienta de apoyo para la identificación de áreas prioritarias desde una perspectiva de planificación territorial y gestión del riesgo.

Finalmente, los resultados de esta investigación ponen de manifiesto la necesidad de ampliar y profundizar los estudios de remociones en masa en sectores rurales y cordilleranos, históricamente subrepresentados en los sistemas oficiales de información. El inventario y el mapa de susceptibilidad generados constituyen una base inicial que puede ser complementada y refinada mediante la incorporación de nuevos eventos, análisis multitemporales y enfoques participativos que integren el conocimiento local. En este sentido, el estudio no solo contribuye a reducir brechas de información territorial, sino que también abre oportunidades para el desarrollo de investigaciones futuras orientadas a una gestión del riesgo más equitativa, preventiva y territorialmente pertinente.

VII. REFERENCIAS

- Araya Parra. (2014). *Análisis de susceptibilidad por remoción en masa en el valle Las Trancas, Región del Biobío, Chile [Tesis de magíster, Universidad de Concepción]. Repositorio Magíster Geografía UdeC.* Obtenido de https://www.magistergeografia-udec.cl/wp-content/uploads/2019/08/2014_Tesis-Magister-Analisis-Geografico-Scarlett-Lorena-Araya-Parra.pdf
- Araya Parra. (2014). *Evaluación de la susceptibilidad a remociones en masa mediante técnicas estadísticas y SIG en la precordillera de Santiago. Tesis de Magíster, Universidad de Chile.*
- Araya-Parra. (2014). *Evaluación de susceptibilidad a remociones en masa mediante métodos estadísticos en la cuenca del río Itata, Región del Biobío.*
- Archivo Histórico del Alto Biobío. (2014). *Título de Merced "Antonio Canio" 2814, Trapa Trapa, Butalebún, Alto Biobío.*
- Archivo Histórico del Alto Biobío. (2014). *Título de Merced 2835 "José Anselmo Pavian" 1919, Cauñicu .*
- Berkes, F., Colding, J., & Folke, C. (2000). *REDISCOVERY OF TRADITIONAL ECOLOGICAL KNOWLEDGE AS ADAPTIVE MANAGEMENT.*
- Eco Bio Bio. (2022). *Remoción en masa, comuna de Alto Biobío. .*
- Campos, c. (2014). *Susceptibilidad a remociones en masa, Quebrada Los Chanchos, Región Metropolitana [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio Académico. .*
- Castro-Venegas, C. V. (2025). *Multi-source landslide inventories for susceptibility assessment: A case study in the Concepción Metropolitan Area, Chile. Landslides.*
- CONADI. (2019). *Catastro de comunidades y títulos de merced del Alto Biobío. Corporación Nacional de Desarrollo Indígena. .*
- Cutter, S. (2003). *The vulnerability of science and the science of vulnerability. Annals of the Association of American Geographers.*

- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). *Landslide types and processes*. In A.K. Turner & R.L. Schuster (Eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation* (pp. 36–75). *Transportation Research Board Special Report 247*.
- Dirección General de Aguas. (2012). *Estudio hidrogeológico cuenca Bío Bío*. Ministerio de Obras Públicas. .
- Doan, V. L., Nguyen, B. Q. V., Pham, H. T., Nguyen, C. C., and Nguyen, C. T. (2023). Effect of time-variant NDVI on landside susceptibility: a case study in Quang Ngai province, Vietnam.
- Eco Bio Bio . (2022). *Remoción en masa, comuna de Alto Biobío*.
- Gajardo, L. (2025). *REMOCIONES EN MASA DESENCADENADAS POR LLUVIAS EN LA CORDILLERA DE LOS ANDES: INVENTARIO 2023-2024 PARA LA REGIÓN DEL BIOBÍO, CHILE*.
- Gaillard, J. C., & Mercer, J. (2013). *From knowledge to action: Bridging gaps in disaster risk reduction*.
- García-Rodríguez, M.J., Malpica, J.A., Benito, B., Díaz, M., 2008. Susceptibility assessment of earthquake-triggered landslides in El Salvador using logistic regression. *Geomorphology* 226, 15-24.
- Guo, X., Fu, B., DU , J., Shi, P., Li, J., Li, Z., . . . Fu, H. (2021). *Monitoring and Assessment for the Susceptibility of Landslide Changes After the 2017 Ms 7.0 Jiuzhaigou Earthquake Using the Remote Sensing Technology*.
- Hauser, A. (2000). *Remoción en masa*. Boletín No. 59, versión actualizada. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Hillerns, C . (2025). *Remociones en masa del límite sur oriental de la península de Tumbes y su relación con la Falla San Vicente, Talcahuano, Región del Biobío, Chile [Tesis de pregrado, Universidad de Concepción]*. Repositorio UdeC. .
- INE. (2017). *Resultados Censo 2017*.
- La Tribuna. (2024). *Alto Biobío: El paraíso de los saberes ancestrales y las maravillas geológicas*.

- Lagos, M., & Montecinos, A. (2023). *Cambios en la precipitación extrema y sus implicancias en remociones en masa en Chile central*. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*,
- Lara, M. C., & Sepúlveda, S. V. (2008). *Remociones en masa*. Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Lee, S., & Biswajeet, P. (2006). *Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models*.
- Manríquez, F. (2024). *Aplicación de los estudios fundados de riesgo en la planificación urbana comunal: análisis de su uso en PRC con zonificación de riesgo por remociones en masa [Tesis de pregrado, Universidad de Concepción]*. Repositorio UdeC. .
- Marchant, C. (2019). *La práctica trashumante pehuenche en la Araucanía andina: una forma de construir y habitar los territorios de montaña del sur de Chile*. *Revista de Geografía Norte Grande*, 187–206.
- Marchant, C. (2019). *Territorio y espiritualidad: La trashumancia pehuenche en Alto Biobío*. *Revista Identidades*,.
- Mardones, M. & Rojas, J. (2012). *Procesos de remoción en masa inducidos por el terremoto del 27F de 2010 en la franja costera de la Región del Biobío, Chile*. *Revista de Geografía Norte Grande*, 57–74.
- MINVU. (2024). *Guía metodológica para estudios de riesgo geológico en planificación territorial*. Santiago, Chile.
- MINVU. (2024). *Guía metodológica para la elaboración de estudios de riesgo de los Planes Reguladores Comunales*. .
- Monsalve, M. (2024). *Gobierno advierte "riesgo de remoción en masa alto" desde Valparaíso al Biobío*. *24horas.cl*. .
- Municipalidad de Alto Biobío. (2017). *Diagnóstico participativo comunidad Alto Biobío*.
- Municipalidad de Alto Biobío. (2024). *Datos de la comuna*.

- Muñoz, J., & Niemeyer, H. (1984). *PETROLOGIA DE LA FORMACION TRAPA-TRAPA Y CONSIDERACIONES ACERCA DEL VOLCANISMO MIOCENO ENTRE LOS 36° Y 39° LAT. S (CORDILLERA PRINCIPAL)*.
- Núñez, N. M. (2025). *SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN MASA EN LAS COMUNAS DE TALCAHUANO, TOMÉ, PENCO Y HUALPÉN: REGIÓN DEL BIOBÍO, CHILE*.
- Orellana, A. R. (2025). *SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN MASA EN LAS COMUNAS DE SAN PEDRO DE LA PAZ, CORONEL, LOTA Y SANTA JUANA, PROVINCIA DE CONCEPCIÓN, REGIÓN DEL BIOBÍO, CHILE*.
- Ramírez Lagos, V., & Clavero Ribes, J.. (2023). *Remociones en masa en el escenario actual de cambio climático en la precordillera de Chile central. Universidad Mayor. .*
- Resumen. (2024). *Distintas localidades en alerta por riesgo de remociones en masa tras seguidilla de temporales en el Biobío .*
- Revista Anfibia. (2024). *Alto Biobío, un espacio en disputa*.
- Schachter, C. (2008). *Evaluación de susceptibilidad a remociones en masa mediante análisis multivariado: Sector nororiente de la cuenca de Santiago [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio Académico*.
- Scheaffer, R. L., Mendenhall, W., & Ott, R. L. (2012). *Elementary Survey Sampling*.
- Sepúlveda, S. A., & Serey, A. (2009). *Mass movements in the Chilean Andes: Distribution, triggering factors and hazard assessment. Geomorphology,.*
- Sepúlveda, S., & Náquira, V. (2011). *Susceptibilidad de Remociones en Masa Costeras y Amenazas Asociadas en la Patagonia Chilena: El Caso del Área de Hornopirén (42°S)*.
- SERNAGEOMIN. (2020). *Inventario nacional de remociones en masa (2009–2019)*.
- Silva, R. P., Coelho Netto, A. L., & Alvarenga Lacerda, W. (2023). *Hydro-geomorphological conditions for the classification of terrain susceptibility to shallow translational landslides: a geo-hydro ecological approach*.
- Shalaby, A. (2019). *Visibilizando el paisaje cultural Pehuenche: ruta patrimonial en la Comunidad El Barco, Alto Bío Bío, VIII Región [Tesis de Magíster, Pontificia Universidad Católica de Chile]. Repositorio UC. .*

Van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2006). *Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2006). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. Engineering Geology, 112–131.*

Weiss, A. (2001). *Topographic Position and Landforms Analysis* . The Nature Conservancy.

Zúñiga Armijo, S., Jaque Castillo, E. & Astudillo Reyes, L. (2025). “Sensores humanos” y el relacionamiento con los municipios de la Región del Biobío (Chile) para la gestión de riesgo de multiamenazas. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER, 9(2), 77-92.* <https://doi.org/10.55467/reder.v9i2.196>.

VII. ANEXO

Tabla 4. Factores condicionantes y frequency ratio													
Factor	Class	Class Pixels	Class pixels (%)	Pixels Landslides	Pixels Landslides (%)	FR	RF	RF (%)	Min RF	Max RF	Max-Min RF	(Max-Min RF)min	PR
pendiente	0° a 10	171906	19,58%	0	0,00%	0,000	0,000	0	0,000	0,703	0,703		2,37
	10° a 20°	219149	24,97%	0	0,00%	0,000	0,000	0					
	20° a 30	233428	26,59%	3	17,65%	0,664	0,070	7					
	30° a 45°	214774	24,47%	9	52,94%	2,164	0,227	23					
	> 45°	38501	4,39%	5	29,41%	6,705	0,703	70					
	Total	877758	100,00%	17	100,00%	9,533	1,000	100					
orientacion	Flat (-1)	0	0,00%	0	0,00%	0	0,000	0	0,000	0,360	0,360	0,297	1,21
	N (337.5 - 22.5°)	135793	15,57%	0	0,00%	0,000	0,000	0					
	NE (22.5 - 67.5°)	103758	11,89%	2	11,76%	0,989	0,134	13					
	E (67.5 - 112.5°)	80979	9,28%	1	5,88%	0,634	0,086	9					
	SE (112.5 - 157.5°)	63376	7,26%	1	5,88%	0,810	0,110	11					
	S (157.5 - 202.5°)	84909	9,73%	0	0,00%	0,000	0,000	0					
	SW (202.5 - 247.5°)	135675	15,55%	7	41,18%	2,648	0,360	36					
	W (247.5 - 292.5°)	137937	15,81%	4	23,53%	1,488	0,202	20					
	NW (292.5 - 337.5°)	129967	14,90%	2	11,76%	0,790	0,107	11					
Total	872394	100,00%	17	100,00%	7,358	1,000	100						
Curvatura	Concave (< - 2.0)	203120	23,14%	2	11,76%	0,508	0,197	20	0,197	0,506	0,310		1,04
	Planar (-2.0 - 2.0)	473166	53,91%	12	70,59%	1,309	0,506	51					
	Convex (> 2.0)	201472	22,95%	3	17,65%	0,769	0,297	30					
	Total	877758	100%	17	100,00%	2,587	1,000	100					
NDVI	Water (<-0.042)	44322	5,10%	0	0,00%	0,000	0,000	0	0,000	0,684	0,684		2,31

	Built & Barren land (-0.042 – 0.182)	367325	42,31%	13	76,47%	1,808	0,684	68					
	Grass (0.182–0.327)	245052	28,22%	4	23,53%	0,834	0,316	32					
	Sparse Vegetation (0.327–0.425)	158270	18,23%	0	0,00%	0,000	0,000	0					
	Dense Vegetation (0.425–0.503)	49133	5,66%	0	0,00%	0,000	0,000	0					
	Very Dense Vegetation (>0.503)	4152	0,48%	0	0,00%	0,000	0,000	0					
	Total	868254	100,00%	17	100,00%	2,641	1,000	100					
geología	Secuencias volcanicas	642860	73,24%	12	70,59%	0,964	0,357	36	0,000	0,643	0,643		2,17
	Secuencias volcanosedimentario	149022	16,98%	5	29,41%	1,732	0,643	64					
	sedimentos de fondo de valle	85906	9,79%	0	0,00%	0,000	0,000	0					
	Total	877788	100,00%	17	100,00%	2,696	1,000	100					
Altura	930-1000 msnm	11399	1,85%	0	0,00%	0,000	0,000	0	0,000	0,297	0,297		1,00
	1000-1250 msnm	67741	10,98%	2	11,76%	1,072	0,159	16					
	1250-1500 msnm	78980	12,80%	2	11,76%	0,919	0,136	14					
	1500-1750 msnm	148689	24,09%	5	29,41%	1,221	0,181	18					
	1750-2000 msnm	133023	21,55%	3	17,65%	0,819	0,121	12					
	2000-2250 msnm	100802	16,33%	2	11,76%	0,720	0,107	11					
	2250-2500 msnm	54389	8,81%	3	17,65%	2,002	0,297	30					
	2500-2750 msnm	14541	2,36%	0	0,00%	0,000	0,000	0					
	2750-3000 msnm	7608	1,23%	0	0,00%	0,000	0,000	0					
	>3000 msnm	7	0,00%	0	0,00%	0,000	0,000	0					
Total	617179	100,00%	17	100,00%	6,754	1,000	100						
geomorfología	cañones, arroyos profundamente excavados (1)	45749	5,21%	0	0,00%	0,000	0,000	0	0,000	0,369	0,369		1,24

drenajes de media ladera, valles poco profundos (2)	67020	7,64%	2	11,76%	1,541	0,129	13					
drenajes de tierras altas, cabeceras (3)	11692	1,33%	1	5,88%	4,416	0,369	37					
valles en forma de U (4)	114884	13,09%	0	0,00%	0,000	0,000	0					
llanuras (5)	46221	5,27%	0	0,00%	0,000	0,000	0					
laderas abiertas (6)	382304	43,55%	7	41,18%	0,945	0,079	8					
laderas superiores, mesetas (7)	80453	9,17%	4	23,53%	2,567	0,214	21					
crestas/colinas locales en los valles (8)	5458	0,62%	0	0,00%	0,000	0,000	0					
crestas de media ladera, pequeñas colinas en llanuras (9)	61939	7,06%	2	11,76%	1,667	0,139	14					
cimas de montañas, crestas altas (10)	62038	7,07%	1	5,88%	0,832	0,070	7					
Total	877758	100,00%	17	100,00%	11,969	1,000	100					

Fuente: Elaboración propia 2026