



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
GEOLOGÍA

**ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD DE PROCESOS DE
REMOCIÓN EN MASA EN LA CUENCA DE NONGUÉN,
CONCEPCIÓN, REGIÓN DEL BIOBÍO, CHILE.**

Memoria para optar al Título de Geólogo

Álvaro Alfonso Rozas Ruiz

Profesor Guía: Dr. Mauricio Esteban Espinoza Vargas
Profesora Co-Guía: MSc. Natalia Sofía Sepúlveda Díaz
Profesor Comisión: Dr. Joaquín Alejandro Cortés Aranda

Concepción, 2024

INDICE

RESUMEN.....	ix
1. Introducción.....	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo general	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Ubicación y accesos.....	2
1.4 Clima.....	3
1.5 Trabajos anteriores.....	4
2. Marco Geológico	6
2.1 Geomorfología.....	6
2.1.1 Plataformas graníticas.....	7
2.1.2 Cordones graníticos	7
2.2 Geología.....	7
2.2.1 Basamento Metamórfico.....	8
2.2.1.1 Serie Occidental	9
2.2.1.2 Serie Oriental.....	9
2.2.2 Granitoides Concepción	9
2.2.3 Depósitos no consolidados	10
3. Marco teórico.....	11
3.1 Riesgo y peligro geológico	11
3.1.1 Susceptibilidad.....	11
3.1.2 Peligro geológico.....	11
3.1.3 Amenaza	11

3.1.4	Vulnerabilidad	11
3.1.5	Exposición	12
3.1.6	Riesgo	12
3.2	Remociones en masa.....	12
3.2.1	Remoción en masa.....	12
3.2.2	Suelo	13
3.2.3	Suelo residual	13
3.2.4	Uso de suelo.....	13
3.2.5	Tipos de remociones en masa	13
3.2.5.1	Caídas o desprendimientos.....	14
3.2.5.2	Volcamientos o topples.....	14
3.2.5.3	Deslizamientos	15
3.2.5.4	Flujos.....	16
3.2.5.5	Extensiones Laterales.....	17
3.3	Factores condicionantes.....	17
3.3.1	Geología.....	18
3.3.1.1	Litología	18
3.3.1.2	Grado de alteración y/o meteorización.....	18
3.3.1.3	Estructuras.....	18
3.3.2	Geomorfología.....	19
3.3.2.1	Elevación.....	19
3.3.2.2	Pendiente	19
3.3.2.3	Orientación de la ladera.....	19
3.3.2.4	Forma de las laderas	19
3.3.2.5	Cercanía a redes de drenaje.....	20

3.3.3	Factor antropogénico y uso de suelo	20
3.4	Factores desencadenantes	21
3.4.1	Precipitaciones.....	21
3.4.2	Sismos.....	21
3.4.3	Actividad antropogénica.....	22
4.	Metodología.....	23
4.1	Etapa Gabinete 1	23
4.2	Etapa Terreno	24
4.3	Etapa Gabinete 2.....	24
4.4	Selección de la cuenca de trabajo	24
4.5	Evaluación de la susceptibilidad a remociones en masa.....	25
4.5.1	Proceso Analítico Jerárquico (AHP).....	25
4.5.2	Selección de los factores condicionantes.....	27
4.5.3	Método de ponderación de mapas temáticos	28
4.5.4	Reclasificación de factores condicionantes	28
4.5.5	Generación de mapas ráster reclasificados.....	29
4.5.6	Matriz de comparación entre pares.....	29
4.5.7	Elaboración de mapa de susceptibilidad de remociones en masa	29
4.5.8	Elaboración de mapa de inventario de remociones en masa	30
4.5.9	Validación del mapa de susceptibilidad.....	30
4.5.10	Evaluación del peligro frente a remociones en masa	30
5.	Resultados.....	31
5.1	Reclasificación de factores condicionantes	31
5.2	Mapas temáticos reclasificados.....	32
5.2.1	Factores topográficos.....	32

5.2.1.1	Elevación.....	32
5.2.1.2	Pendiente.....	33
5.2.1.3	Orientación de ladera	34
5.2.1.4	Forma de la ladera.....	35
5.2.1.5	Cercanía a redes de drenaje.....	36
5.2.2	Factores antropogénicos	37
5.2.2.1	Usos de suelo.....	37
5.3	Ponderaciones mapas temáticos.....	38
5.4	Mapa de susceptibilidad.....	39
5.5	Inventario de remociones en masa.....	40
6.	Discusión	43
6.1	Información disponible y mapeo	43
6.2	Validación mapa susceptibilidad.....	44
6.3	Factores condicionantes.....	47
6.3.1	Geología.....	48
6.3.2	Grado de alteración y/o meteorización.....	48
6.3.3	Estructuras	49
6.3.4	Elevación	49
6.3.5	Pendiente	50
6.3.6	Orientación de ladera.....	51
6.3.7	Forma de ladera	52
6.3.8	Cercanía red de drenaje	53
6.3.9	Uso de suelo.....	54
6.4	Factores desencadenantes	56
6.4.1	Precipitaciones.....	56

6.4.2	Actividad antropogénica.....	58
6.5	Análisis de susceptibilidad.....	58
6.6	Evaluación del peligro frente a remociones en masa.....	59
7.	Conclusiones.....	60
8.	Referencias	61
9.	Anexos	65

INDICE FIGURAS

Figura 1.1:	Mapa de ubicación área de estudio	3
Figura 1.2:	Precipitaciones mensuales registradas por la estación Estero Nongué frente a Universidad del Biobío, durante el año 2023. Datos obtenidos de la Dirección General de Aguas (DGA).	4
Figura 2.1:	Mapa geomorfológico de la zona de estudio. Modificado de EULA 2002 y Ramírez 2004	6
Figura 2.2:	Mapa geológico de la zona. Modificado de EULA 2002 y Ramírez 2004	8
Figura 3.1:	Esquemas de caídas o dresprendimientos. a) Caída de rocas b) Caída de suelo . Extraído y modificado de González y Ferrer (2011)	14
Figura 3.2:	Esquemas de volcamientos o topples. a) y b) Volcamientos de rocas en bloques. c) Volcamiento de suelo. Extraído y modificado de González y Ferrer (2011).	15
Figura 3.3:	Esquema de deslizamientos traslacionales. a) y b) Deslizamiento de roca. c) Deslizamiento de suelo. Extraído y modificado de González y Ferrer (2011).	16
Figura 3.4:	Esquema de deslizamiento rotacionales. a) y b) Deslizamiento de suelo. c) Deslizamiento de roca. Extraído y modificado de González y Ferrer (2011).	16
Figura 3.5:	Esquema de flujos en distintos materiales. a) Flujo de tierra o lodo. b) Flujo de detritos. c) Avalancha de rocas. Extraído y modificado de González y Ferrer (2011).	17
Figura 3.6:	Esquema de extensiones laterales. a) Extensión lateral de suelo. b) Extension lateral de rocas o bloques. Extraído y modificado de González y Ferrer (2011).	17
Figura 3.7:	Esquema curvatura de perfil.	20

Figura 4.1: Mapa conceptual de procedimiento utilizado para la generación de resultados.	23
Figura 5.1: Mapa de elevación.	32
Figura 5.2: Mapa de elevación reclasificado.	32
Figura 5.3: Mapa de pendientes.	33
Figura 5.4: Mapa de pendientes reclasificado.	33
Figura 5.5: Mapa de orientación de laderas.	34
Figura 5.6: Mapa de orientación de laderas reclasificadas.	34
Figura 5.7: Mapa de forma de ladera.	35
Figura 5.8: Mapa de forma de ladera reclasificado.	35
Figura 5.9: Mapa red de drenaje.	36
Figura 5.10: Mapa red de drenaje reclasificado.	36
Figura 5.11: Mapa uso de suelo.	37
Figura 5.12: Mapa uso de suelo reclasificado.	37
Figura 5.13: Mapa de susceptibilidad. Elaboración propia.	39
Figura 5.14: Mapa de inventario de remociones en masa.	40
Figura 5.15: Zoom mapa de inventario de remociones en masa.	41
Figura 5.16: Remoción en masa reconocida en sector Nonguén.	41
Figura 5.17: Remoción en masa reconocida en sector los Lirios Altos.	41
Figura 5.18: Remoción en masa reconocida en sector Lagos de Chile.	42
Figura 5.19: Remoción en masa reconocida en sector Lagos de Chile.	42
Figura 5.20: Remoción en masa reconocida en sector Palomares.	42
Figura 5.21: Remoción en masa reconocida en sector los Lirios Altos.	42
Figura 6.1: Mapa de susceptibilidad intersectado con el mapa de inventario de remociones en masa	44
Figura 6.2: Mapa de susceptibilidad intersectado con el mapa de inventario de remociones en masa.	45
Figura 6.3: Remociones en masa vistas en terreno vs nivel de susceptibilidad	46
Figura 6.4: Remociones en masa recopiladas bibliográficamente vs nivel de susceptibilidad.	46
Figura 6.5: Remociones en masa totales vs nivel de susceptibilidad.	47

Figura 6.6: Porcentaje de remociones en masa correlacionadas con factores condicionantes asociados a niveles de susceptibilidad.	48
Figura 6.7: Mapa de elevación reclasificado con puntos de remociones en masa.	50
Figura 6.8: Mapa de pendientes reclasificado con puntos de remociones en masa	51
Figura 6.9. Mapa de orientación de laderas reclasificado con puntos de remociones en masa.	52
Figura 6.10: Mapa de forma de ladera reclasificado con puntos de remociones en masa. ...	53
Figura 6.11: Mapa cercanía red de drenaje reclasificado con puntos de remociones en masa.	54
Figura 6.12: Mapa de uso de suelo reclasificado con puntos de remociones en masa.	55
Figura 6.13: Precipitaciones anuales acumuladas (mm) de los años 2005, 2006 y 2023.	56
Figura 6.14: Precipitaciones mensuales (mm) de los años 2005, 2006 y 2023.	57
Figura 6.15: A) Remoción en masa generada por realización de camino y vivienda. B) Remoción en masa generada por la construcción de una vivienda. C) Viviendas construidas en una pendiente superior a 30°.	58

INDICE TABLAS

Tabla 4.1: Escala de Saaty. Extraída y modificada de Saaty (2008).....	26
Tabla 5.1: Clasificación de niveles de susceptibilidad según factor condicionante. Elaboración propia basada en trabajos anteriores.	31
Tabla 5.2: Matriz de comparación entre pares. Se muestran los valores establecidos para cada factor y sus ponderaciones resultantes.....	38

INDICE ANEXOS

Anexo A: Matrices de comparación entre pares.	65
Anexo B: Inventario de remociones en masa.	67
Anexo C: Mapa de susceptibilidad.	89

AGRADECIMIENTOS

Agradecer el apoyo del proyecto Ciencia Pública CP22-C005 “Diálogos en Movimiento: Geoecología y Comunidad en torno al Estero Nonguén” cuyo director es el profesor guía de esta memoria, Dr. Mauricio Espinoza Vargas.

Mi más sincero agradecimiento al profesor Mauricio Espinoza Vargas, quien fue quien me respaldó y orientó a lo largo de todos estos meses de arduo trabajo. Su experiencia, dedicación y apoyo fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo. Asimismo, quiero expresar mi gratitud a Natalia Sepúlveda, quien estuvo siempre disponible durante este periodo, brindando su ayuda con todo el procedimiento. También agradecer a Emiliano Vega, Alberto Sanhueza y Francisco Castro, los cuales me ayudaron en este periodo de trabajo. A todos ellos les agradezco sinceramente por su tiempo, paciencia y conocimientos compartidos

Gracias a mi familia, a mi mamá Maggie, mi papá Eugenio, mis hermanas, Cata y Yaye. Gracias a mis amigos de la Universidad, a la Maitecita, el Flaco, Deivid, Nelsete, Peladio, Chk, Xopaipa Oyarzoico, D. Morales, Palmó y Espi. También agradecer a mis amigos Nico, Seba, Javier, Cristiancin, Alfo, Dano, Josin, Peri, Conichi, Benjiji y la Negri. Gracias a todos ellos por hacer mi estadía en la universidad más amena, gracias por su paciencia, por aguantarme en el día a día, por las risas, los buenos momentos, por su apoyo y el apañe durante todos estos años.

Finalmente, gracias a cada una de las personas que se cruzó en mi camino, compañeros, profesores, amigos y conocidos que aportaron algo de ellos en mí.

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo realizar un análisis de susceptibilidad frente a procesos de remoción en masa para la cuenca de Nonguén, ubicada en la región del Biobío, provincia de Concepción, ciudad de Concepción, comprendiendo entre los $36^{\circ}44'32.19''$ - $36^{\circ}55'13.92''$ S y $73^{\circ}1'37.97''$ - $72^{\circ}53'42.35''$ O aproximadamente, la cual comprende principalmente la cuenca hidrográfica del estero Nonguén.

Para realizar este análisis se consideran los siguientes factores condicionantes: pendiente, elevación, forma de ladera, orientación de ladera, uso de suelo y cercanía a red de drenajes. Estos factores son ponderados mediante el método heurístico de análisis jerárquico (AHP) (Saaty,2008), para posteriormente con el programa QGis generar archivos *rasters* correspondientes a cada uno de ellos y con el método de superposición de datos generar el mapa de susceptibilidad. Asimismo, se realiza un mapeo en terreno de remociones en masa y una recopilación bibliográfica, para obtener un inventario de estos eventos.

El resultado principal es el mapa de susceptibilidad del área de estudio en el cual se interpretan zonas de baja, moderada y alta susceptibilidad. Este mapa se compara con el inventario de remociones en masa para validar el modelo y correlacionar espacialmente la susceptibilidad de las zonas con las remociones en masa mapeadas.

De acuerdo con la metodología y resultados obtenidos se obtuvo una buena correlación entre los eventos y las zonas de susceptibilidad, ubicándose más de un 60% de ellas en zonas de alta susceptibilidad.

Finalmente, los procesos de remociones en masa que ocurren en la zona de estudio tienen como factores condicionantes principales la elevada pendiente, la actividad antrópica y urbanización. Mientras que los factores desencadenantes que gatillan estos eventos son las precipitaciones y nuevamente la intervención humana, teniendo como evidencia registros históricos de precipitaciones y la marcada concentración de remociones en masa en zonas urbanizadas.

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de remociones en masa son un movimiento lento o rápido de un determinado volumen de suelo, roca o ambos. Estos movimientos corresponden a procesos gravitacionales generados por una serie de factores. Estos factores pueden ser de carácter interno, los cuales caracterizan y definen el material (litología, estructura, comportamiento hidrogeológico, propiedades físicas) y externos (aplicación de cargas estáticas o dinámicas, variaciones en las condiciones hidrogeológicas, factores climáticos y alteraciones geométricas de los taludes) (Hauser, 2000). Estos procesos se pueden clasificar según al tipo de movimiento y material involucrado (González de Vallejo y Ferrer, 2011; Hungr et al., 2014), tales como caída de rocas, volcamiento o *topples*, deslizamientos, flujos y extensiones laterales.

La cuenca del Estero Nonguén, es un sector que presenta la ocurrencia de estos eventos. La presencia sustrato rocoso en la cuenca , tanto del basamento metamórfico que está presente en la zona sur de la cuenca, como el complejo granítico (el cual está altamente alterado y se presenta como suelo residual) en que se desarrolla la cuenca del Estero Nonguén, además de las fuertes pendientes que caracterizan el relieve del área, así como una densa red de drenaje con quebradas muy inscritas, generan erosión activa e implican una alta fragilidad del área ante eventos de deforestación, aumentando el riesgo de procesos de deslizamientos de rocas y remociones en masa (EULA, 2002). Por otro lado, es sabido que tanto precipitaciones, así como los sismos son los factores desencadenantes más comunes para la ocurrencia de estos procesos de remoción en masa (González de Vallejo y Ferrer, 2011).

Estos eventos son una de las amenazas más comunes en el país, en consecuencia, de la conformación montañosa que presenta y la necesidad de la ocupación de la población en estos sectores. Anualmente, los procesos de remoción en masa provocan numerosas pérdidas de vidas humanas, además de su impacto económico y deterioro en el nivel de la vida de la población involucrada. (Hauser, 2000).

1.1 Planteamiento del problema

Durante los años 2005 y 2006 se identificaron remociones en masas en varios sectores del gran Concepción, tales como Agüita de la Perdiz, Nonguén, Cerro La Pólvora y Palomares, donde este tipo de fenómenos es recurrente. Esto debido a que se encuentran en zonas que presentan una gran susceptibilidad a la generación de remociones en masa por la fuerte pendiente, condiciones

naturales y la intervención antrópica. Gran parte de estos fenómenos se produjeron debido a las precipitaciones torrenciales ocurridas en la provincia de Concepción durante esos años. (Naranjo et al., 2005; Naranjo et al., 2006).

El presente trabajo se enmarca en la necesidad de definir de forma más detallada las zonas de la cuenca de Nonguén que se ven más propensas a sufrir eventos de remoción en masa y que además puedan afectar a la población circundante. Para lograr este objetivo, en primera instancia se debe reconocer las zonas donde se han producido históricamente eventos de remociones en masa, para así elaborar un inventario de estos eventos y asimismo distinguir los diferentes factores que producen estos movimientos, para finalmente elaborar un mapa de susceptibilidad multicriterio de la zona con énfasis en la zona urbana de la cuenca Nonguén, Se espera que los resultados de esta memoria, puedan ser utilizados como insumos para proyectos futuros de planificación territorial.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Determinar la susceptibilidad frente procesos de remociones en masa en la cuenca del estero Nonguén con énfasis en las áreas urbanas.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Identificar espacialmente las remociones en masa desarrolladas en la cuenca del estero Nonguén, con énfasis en los núcleos urbanos.
2. Analizar espacial y temporalmente las remociones en masas asociadas a la zona de estudio.
3. Elaborar un mapa de susceptibilidad multicriterio frente a procesos de remociones en masa de la zona de estudio a escala 1:10.000.
4. Determinar espacialmente el peligro de las remociones en masa presentes en la cuenca del Estero Nonguén en base a un análisis multicriterio.

1.3 Ubicación y accesos

El área de estudio se ubica en la región del Biobío, provincia de Concepción, ciudad de Concepción, comprendiendo la región entre los 36°44'32.19" - 36°55'13.92" S y 73°1'37.97" - 72°53'42.35" O aproximadamente, la cual comprende principalmente la cuenca hidrográfica del estero Nonguén, que ocupa un área aproximada de 53 km² y que abarca desde la cabecera del estero Máquimavida hasta la desembocadura del estero Nonguén al curso del río Andalién (Ramírez, 2004).

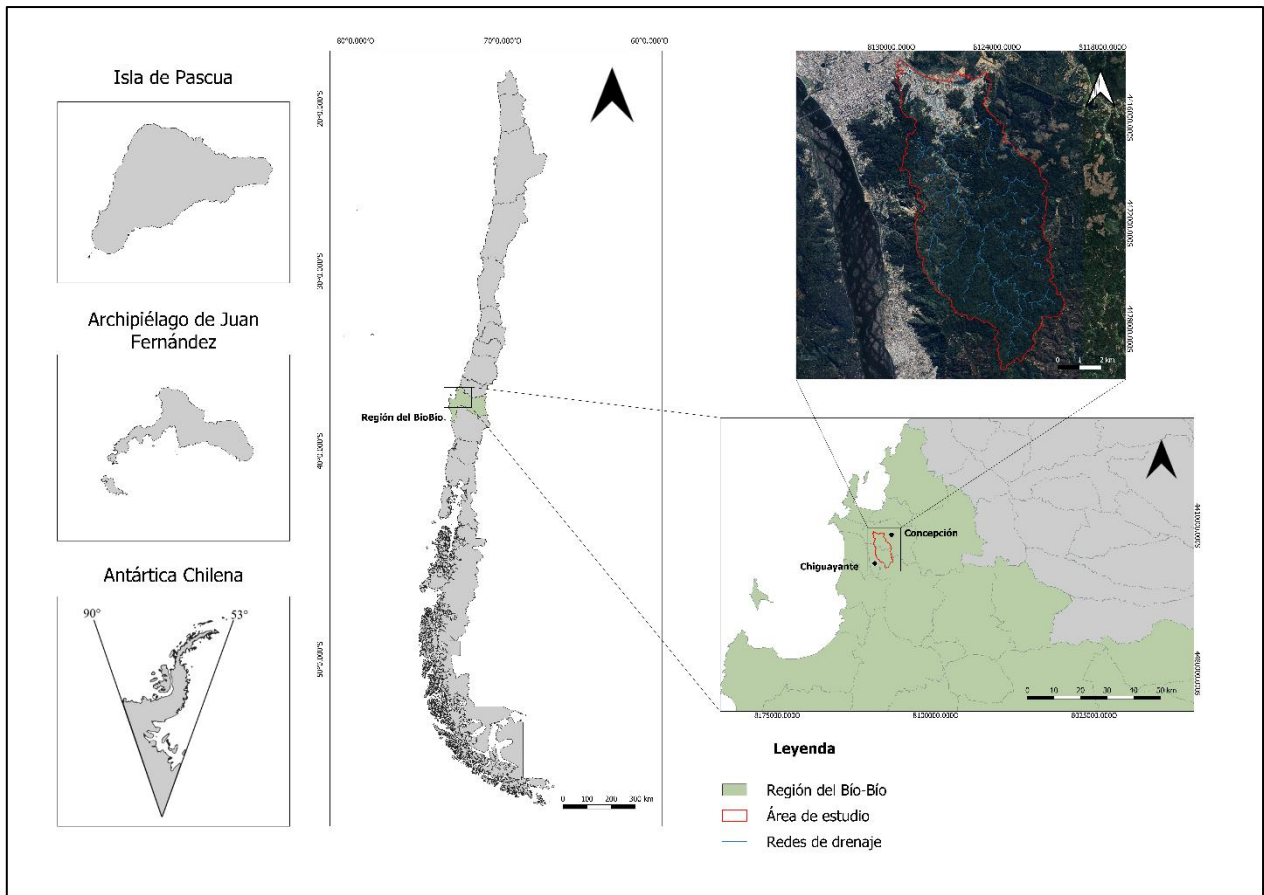


Figura 1.1: Mapa de ubicación área de estudio

Dentro de la zona urbana se abarcan los sectores de Collao, Los Lagos de Chile, Villa Huáscar, Los Lirios, Nonguén, Palomares, Puchacay entre otros. El acceso a la zona de estudio desde la Universidad de Concepción se hace a través de la Av. Roosevelt hasta llegar a la calle Maipú para finalmente encontrarse con la calle General Novoa.

1.4 Clima

El valle central de la octava región, de acuerdo con Köppen (1948) citado en EULA (2002), presenta un clima de tipo Csb: Clima Templado Cálido con Lluvias Invernales. La característica principal de este tipo de clima es la existencia de una estación seca y otra lluviosa. La extensión de la estación seca disminuye al sur. Las temperaturas, si bien es cierto tienden a disminuir por efecto de la latitud, dicha disminución es leve y es frecuente observar sectores con anomalías térmicas producto de la influencia que ejerce el relieve, principalmente la Cordillera de la Costa

Las condiciones meteorológicas del área se relacionan con las características de la ciudad de Concepción. Diversos autores reconocen en el área de estudio el dominio mediterráneo que otorga

a la zona de Concepción un clima Templado Cálido, de tipo Mediterráneo. En este tipo de clima los factores desencadenantes de los riesgos son la concentración de las precipitaciones en una corta temporada invernal y la frecuencia e intensidad de éstas en términos de días. (EULA,2002).

Para la zona de estudio, los datos de la estación meteorológica Estero Nonguén Frente a Universidad del Bio Bío pertenecientes a la Dirección General de Aguas (DGA), fueron registrados durante el presente año (Fig. 1.2), esta muestra que los meses que concentran mayor cantidad de precipitaciones son junio, julio, agosto y septiembre. En contraste con los meses más secos que corresponden a enero, febrero y marzo. El total de precipitaciones acumuladas anuales fueron de 1113.1 mm.

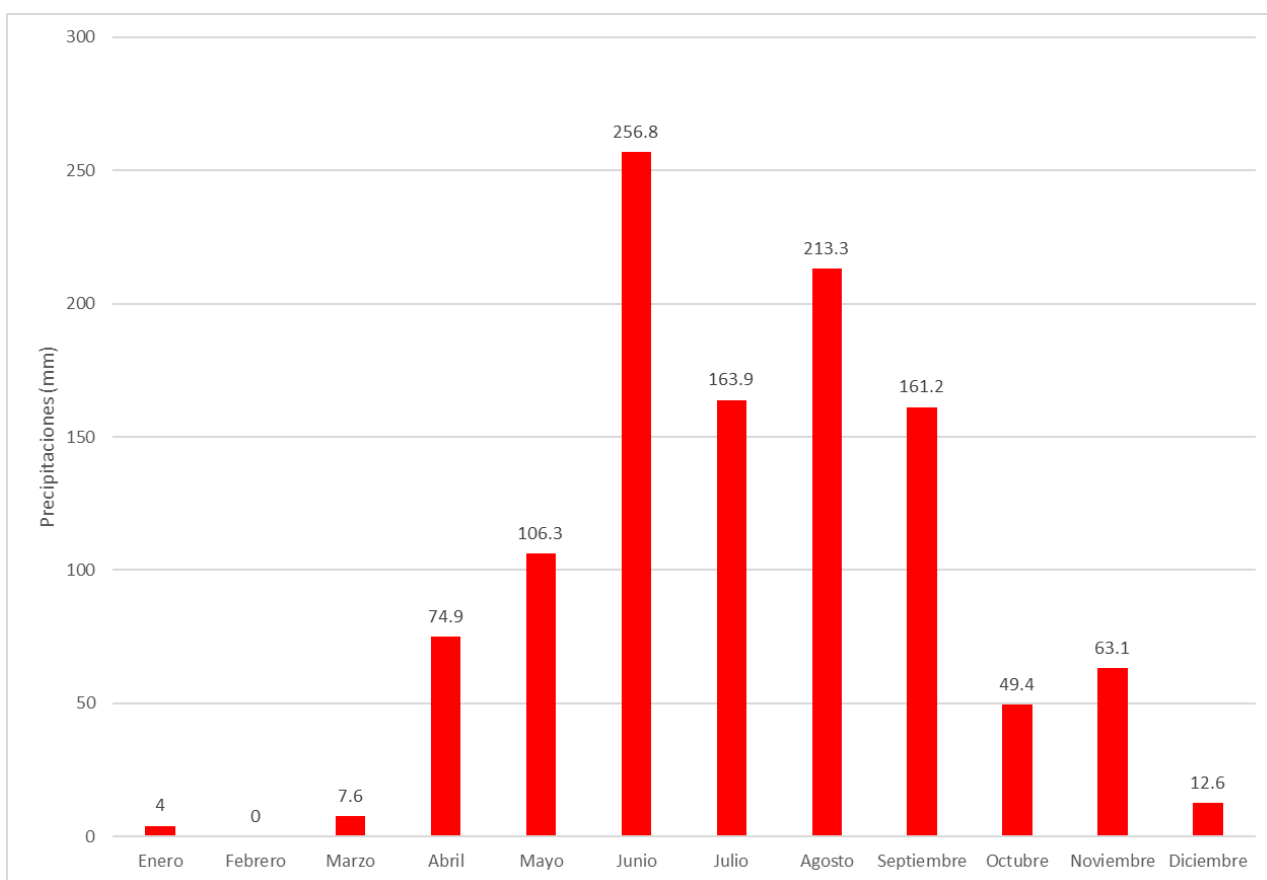


Figura 1.2: Precipitaciones mensuales registradas por la estación Estero Nonguén frente a Universidad del Biobío, durante el año 2023. Datos obtenidos de la Dirección General de Aguas (DGA).

1.5 Trabajos anteriores

Creixell, C. (2001) describe la composición y características de las rocas intrusivas de la zona.

EULA. (2002) describe las principales características del Fundo Nonguén, donde se detalla la geología, geomorfología de la zona de estudio.

Ramírez (2004) describe la Cuenca de Nonguén, principalmente con su geología y geomorfología presente, así como también las coberturas y usos de suelo.

Naranjo et al. (2005, 2006) desarrollan un informe en el cual registran remociones en masa durante los años 2005 y 2006, las cuales afectaron a la zona urbana aledaña a la Cuenca de Nonguén-

CONAF (2019) describe la importancia y detalla la gran biodiversidad presente en el sector de la Reserva Nacional Nonguén.

Gajardo (2022) registra eventos de remociones en masa ocurridas en diferentes comunas del Gran Concepción, siendo gran parte de ellas en la zona de estudio.

2. MARCO GEOLÓGICO

2.1 Geomorfología

La geomorfología del área comprende relieves de erosión (cordones y plataformas, en distintos niveles) y relieves de acumulación (valles locales y llanura aluvial). La cuenca del río Nonguén, es una cuenca predominantemente montañosa inserta en la cordillera de la costa, donde los relieves en altura ocupan más del 90% de la superficie y, los relieves bajos, como llanura fluvial y valles actuales, ocupan menos de un 10%. (EULA,2002)

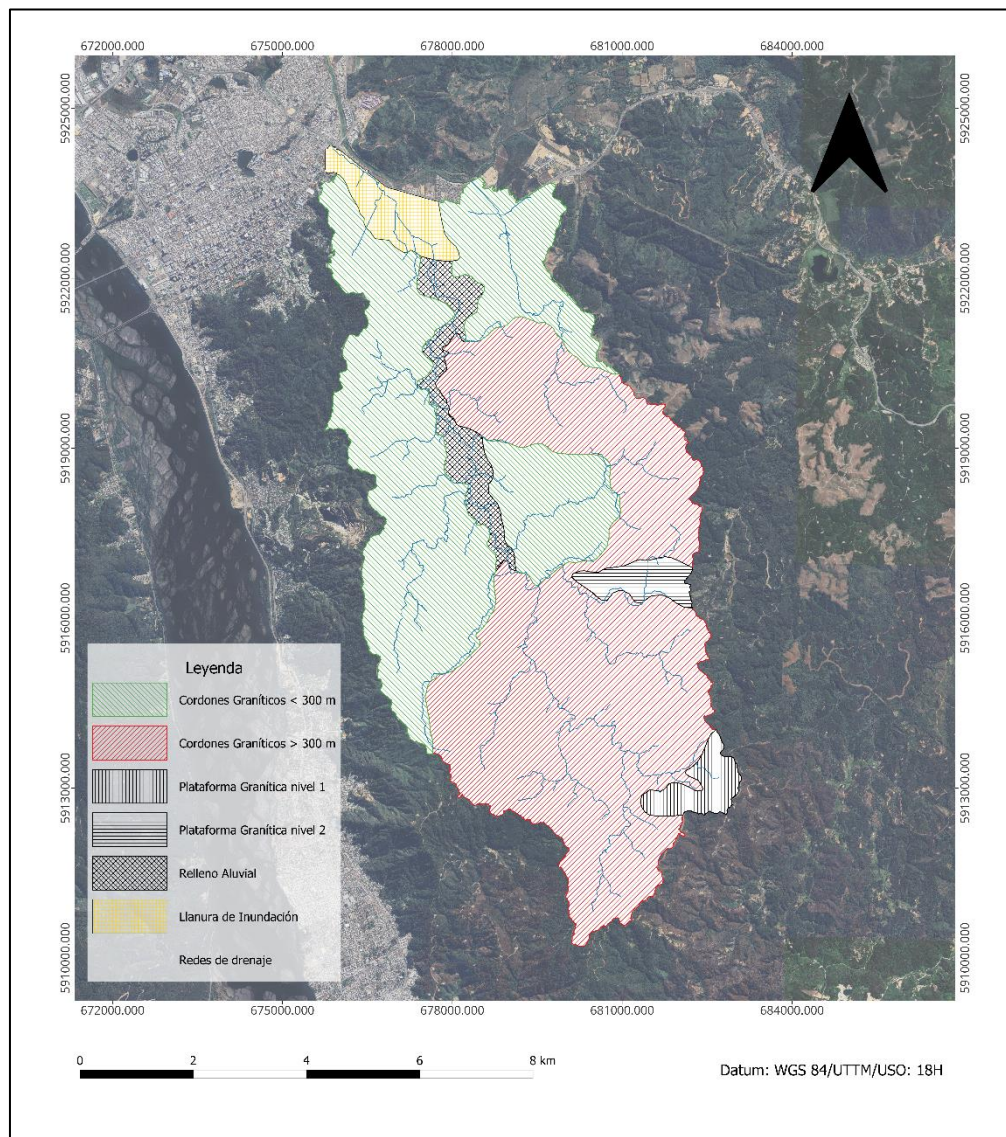


Figura 2.1: Mapa geomorfológico de la zona de estudio. Modificado de EULA 2002 y Ramírez 2004

2.1.1 Plataformas graníticas

Corresponden a relieves altos, sobre los 200 m.s.n.m y representan alrededor de un 7% de la superficie, corresponden a unidades mayores que se extienden hacia el este fuera de la cuenca del Nonguén. Estas unidades corresponden a relieves de erosión, se presentan en dos niveles de acuerdo con su altitud, los más altos (nivel 1) en el sector sur de la cuenca y el nivel 2 en el sector este. Las condiciones topográficas en estas unidades son moderadas, con pendientes en general inferiores a 20%, lo que ha incidido en su acceso y ocupación para actividades agrícolas y forestales, situación que, unida a un manto de roca alterada en superficie, otorga vulnerabilidad a esta unidad a los procesos erosivos. (EULA,2002)

2.1.2 Cordones graníticos

Corresponden a los relieves dominantes de la cuenca, ocupando un 88% de la superficie total. Estos relieves se presentan en dos niveles de altitud; al sur y sureste de la cuenca los cordones graníticos superan los 300 m.s.n.m.; en tanto en el sector norte y noroeste, sus altitudes oscilan entre los 200 y 250 m.s.n.m. La morfometría de pendientes en estas unidades va de moderadas (20%) a fuerte (36%) (EULA,2002)

Las llanuras y valles aluviales del curso inferior del valle del río Nonguén, corresponden en parte a la llanura aluvial del río Andalién, y en parte a la propia conformación de un estrecho valle, con los sedimentos aportados por los cordones graníticos de la cordillera costera. Los sedimentos que forman esta unidad son arenas cuarcíferas denominadas Arenas Andalién, que consisten en arenas finas con limos y arcillas no compactadas, de color castaño amarillento moderado y alcanza potencias de hasta 3 m. Estas arenas proceden de la alteración y erosión del granito de la cordillera de la Costa. Morfométricamente es una llanura plana con umbrales de pendiente inferiores a 2%, topográficamente deprimida con altitudes ligeramente superiores a 10 m s.n.m.; condiciones que le otorgan fragilidad ante eventos de inundación fluvial y anegamientos. (EULA,2002)

2.2 Geología

En el sector de estudio se reconocen tres unidades geológicas principales: El Basamento Metamórfico (compuesto por rocas de la Serie Oriental), los Intrusivos Graníticos del Paleozoico y los sedimentos de valles recientes de edad Holoceno (EULA, 2002).

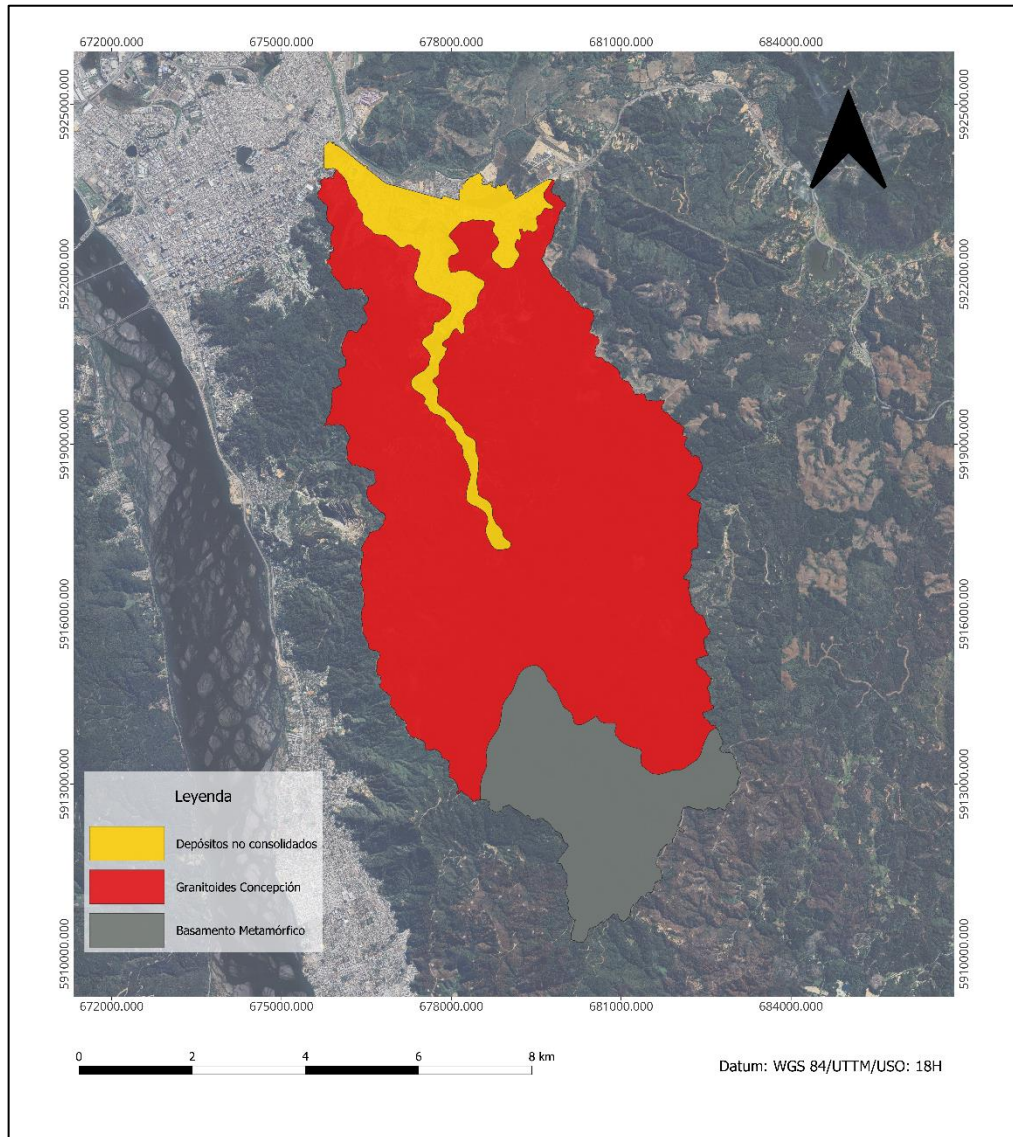


Figura 2.2: Mapa geológico de la zona. Modificado de EULA 2002 y Ramírez 2004

2.2.1 Basamento Metamórfico

El Basamento Metamórfico se dispone como dos franjas paralelas de orientación NNE-SSW, aflorando desde Pichilemu hasta Puerto Montt, incluyendo Chiloé (Gajardo, 1981).

Las franjas del Basamento Metamórfico en su conjunto constituyen un cinturón metamórfico pareado en el cual se reconocen dos series: Serie Occidental y Serie Oriental (Aguirre et al., 1972).

2.2.1.1 Serie Occidental

La serie occidental representa una franja de alto P/T, la cual corresponde a una facie de esquistos verdes a esquistos azules y está compuesta principalmente de micaesquistos, metabasitas, metacherts y serpentinitas. (Hervé, 1977). El protolito de esta serie corresponde a sedimentos siliciclásticos de origen continental y lonjas de corteza oceánica. (Hervé, 2007)

Mediante dataciones U-Pb SHRIMP en circones detríticos de esquistos de esta unidad, se ha restringido su edad de deposición a un máximo entre 330 y 345 Ma, encontrándose solo una edad más joven de 307 Ma (Hervé et al., 2013).

2.2.1.2 Serie Oriental

La serie oriental representa una franja de alta temperatura y baja presión, la cual corresponde a una facie de esquistos verdes a granulito inferior y está compuesta principalmente de metragrauvacas, filitas, córneas, gneis. (Hervé, 1977; Hervé, 2007)

La edad máxima de deposición del protolito para esta unidad se estima en 345 Ma, en base a resultados U-Pb SHRIMP en circones detríticos de esquistos pelíticos de la Serie Oriental (Hervé et al., 2013)

2.2.2 Granitoides Concepción

El Batolito Costero del Sur corresponde a un conjunto de cuerpos plutónicos que afloran en la parte central de la Cordillera de Nahuelbuta, los cuales están distribuidos de forma continua entre los 32°30' y los 38°00' de latitud sur. (Hervé, 1987)

Las rocas del Batolito Costero del Sur corresponden principalmente a granodioritas, tonalitas de biotita, hornblendas y en menor cantidad dioritas y granitos. Texturalmente, las rocas de esta unidad son de grano grueso y, en ciertas partes de grano medio. La litología presenta una zonación lateral, en la que las granodioritas y tonalitas forman la parte central del batolito y hacia los márgenes, dominan las composiciones más diferenciadas, como algunos cuerpos pegmatíticos y granitos de biotita y muscovita. (Creixell, 2001)

La edad del batolito está acotada entre los 300 y los 320 Ma. aproximadamente. El corto periodo de emplazamiento se asocia a una migración del arco a raíz de cambios en los parámetros de subducción (Deckart et al., 2014).

2.2.3 Depósitos no consolidados

Los Sedimentos de Valles Actuales (de edad Holoceno), corresponden a las Arenas Andalién, conformadas por los sedimentos arrastrados por los ríos y esteros desde los cordones graníticos costeros. La textura de estas arenas es arcillosa y limosa, típicas de los procesos de sedimentación (EULA, 2002).

En el área de estudio, los depósitos no consolidados de sedimentos fluviales de los valles actuales están compuestos por arenas y gravas de origen ígneo y metamórfico, arrastrados por los afluentes del estero Nonguén desde los cordones montañosos adyacentes. La llanura de inundación de la cuenca está formada por abundante material micáceo, arcillas y limos de color pardo claro (Ramírez, 2004; Basso, 2015)

3. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se dan a conocer algunas de las principales definiciones referentes a términos y procesos claves en el estudio de las remociones en masa, las cuales se compilaron a partir de la revisión bibliográfica de distintos autores en la materia. Muchos de estos conceptos pueden tener significados diferentes dependiendo del autor que los defina, por lo que en esta sección se recopilan aquellas definiciones que más se adecuan al objetivo de este trabajo.

3.1 Riesgo y peligro geológico

A continuación, se definen conceptos relacionados al riesgo y peligro geológico.

3.1.1 Susceptibilidad

Es la capacidad o potencialidad de una unidad geológica o geomorfológica de ser afectada y generar un proceso geológico determinado. Representa la posibilidad espacial de ocurrencia y no establece relación alguna con la probabilidad temporal de que se produzca el proceso. (SERNAGEOMIN, 2012)

3.1.2 Peligro geológico

Un peligro geológico es un evento o proceso natural (erupciones volcánicas, remociones en masa, inundaciones, terremotos, tsunamis), generado por la dinámica interna o superficial del planeta, que pueden ocasionar daño a la sociedad o al ambiente. Para definir los peligros geológicos que afecten una zona determinada, es necesario estudiar aquellos eventos acontecidos en el pasado, así mismo estimar aquellos que, dado las condiciones actuales, podrían ocurrir en el futuro. (SERNAGEOMIN, 2012)

3.1.3 Amenaza

Se entiende como amenaza a la probabilidad de la ocurrencia en un espacio y tiempo determinado uno o varios fenómenos físicos peligrosos que pueden contribuir a generar daños y pérdidas de tal manera que la sociedad entra en una condición de desastre. Por lo tanto, se puede decir que las amenazas también son una categoría que solo se puede analizar, en relación a grupos sociales y su contexto (Lavell, 2001)

3.1.4 Vulnerabilidad

Las características y las circunstancias de una comunidad, sistema o bien que los hacen susceptibles a los efectos dañinos de una amenaza. (UN/ISDR, 2009)

Factor de riesgo interno de un elemento o grupo de elementos expuestos a una amenaza. Corresponde a la predisposición o susceptibilidad física, económica, política o social que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que se manifieste un fenómeno peligroso de origen natural, socio natural o antropogénico (Lavell,2001)

3.1.5 Exposición

La exposición se define como la disposición sobre el territorio de un conjunto de bienes a preservar que pueden ser dañados por una amenaza natural. (UN/ISDR,2009)

3.1.6 Riesgo

La combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas. (UN/ISDR, 2009)

La probabilidad de consecuencias negativa, daños y pérdidas esperadas, (muertes, lisiados, en la propiedad, medios de vida, la actividad económica y social, la cultura e historia, etc.) como resultado de la interacción entre amenazas y elementos sociales y económicos expuestos en un sitio particular y durante un periodo de tiempo de exposición definido (Lavell,2001) En términos más simples implica que el riesgo se obtiene a partir de relacionar la amenaza, o probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de una intensidad específica, con la vulnerabilidad de los elementos expuestos, lo que conlleva a la siguiente fórmula

$$R = A * V * E$$

R= Riesgo; A= Amenaza; V= Vulnerabilidad; E= Exposición

3.2 Remociones en masa

A continuación, se definen conceptos asociados a procesos de remociones en masa, sus diferentes tipos y clasificaciones.

3.2.1 Remoción en masa

Los procesos de remociones en masa son un movimiento lento o rápido de un determinado volumen de suelo, roca o ambos. Estos movimientos corresponden a procesos gravitacionales generados por una serie de factores. Estos procesos se pueden clasificar según el tipo de movimiento y material involucrado. (Varnes, 1996; González de Vallejo y Ferrer, 2011; Hungr et al., 2014)

3.2.2 Suelo

Los suelos se forman por el proceso natural de desintegración de la roca y descomposición de la materia orgánica. (Young, 2012)

Los suelos, según la ingeniería geológica, son agregados naturales de granos minerales unidos por fuerzas de contacto normales y tangenciales a las superficies de las partículas adyacentes, separables por medios mecánicos de poca energía o por agitación en agua. (González de Vallejo y Ferrer, 2011)

3.2.3 Suelo residual

Los suelos residuales se forman directamente por la meteorización física y química de la roca subyacente, puede presentar claras características estructurales y litológicas de esta roca, lo que puede llevar a una posible identificación de ella. Algunos lo llaman saprolito (Wesley, 2010).

3.2.4 Uso de suelo

El uso de suelo se refiere al propósito o función para el cual se emplea y explota una cobertura de suelo, implica la manera en la que se manipulan los atributos biofísicos de la tierra, así como la intención para la que se utilizan, es decir, corresponde a las actividades desarrolladas sobre una cobertura (Lambin, 2006).

3.2.5 Tipos de remociones en masa

Existen distintas clasificaciones para los procesos de remociones en masa, esto dependiendo del autor. Para este trabajo se utilizará como base la clasificación de los trabajos de Hungr et al. (2014) y González y Ferrer (2011), los cuales se basan en la clasificación de Cruden y Varnes (1996). Las remociones en masa han sido clasificadas por estos autores en las siguientes categorías principales:

- Caídas o desprendimientos
- Volcamientos o *topples*
- Deslizamientos
- Flujos
- Extensiones laterales

Las cuáles serán explicadas a continuación:

3.2.5.1 Caídas o desprendimientos

Los desprendimientos son caídas libres muy rápidas de bloques o masas rocosas independizadas por planos de discontinuidad preexistentes (tectónicos, superficies de estratificación, grietas de tracción, etc.). Son frecuentes en laderas de zonas montañosas escarpadas, en acantilados y, en general, en paredes rocosas, siendo frecuentes las roturas en forma de cuña y en bloques formados por varias familias de discontinuidades. Estos procesos pueden dar inicio al proceso de volcamiento o *topples*, por lo tanto, es difícil separarlo uno de otro. (Gonzalez y Ferrer ,2011)

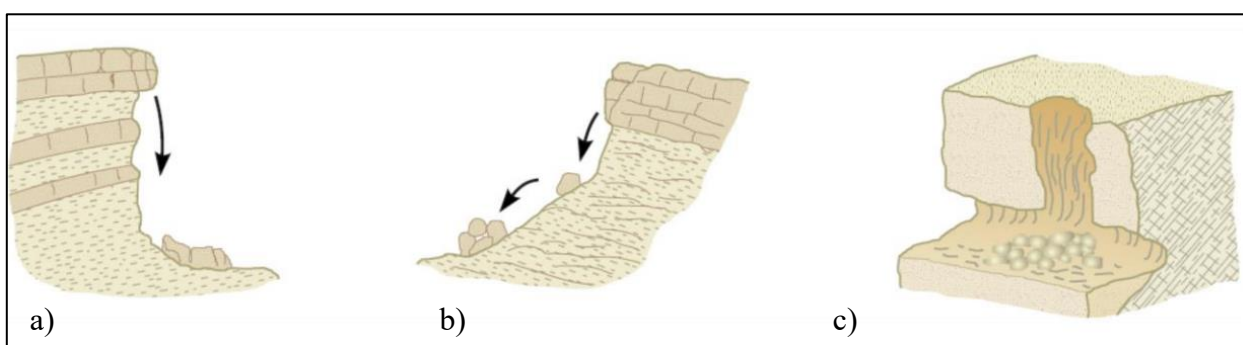


Figura 3.1: Esquemas de caídas o desprendimientos. a) Caída de rocas b) Caída de suelo . Extraído y modificado de González y Ferrer (2011)

3.2.5.2 Volcamientos o topples

Los vuelcos de estratos o de fragmentos de masas rocosas o *topples*, Se producen cuando los estratos buzan en sentido contrario a la ladera, por estar fracturados en bloques o por rotura de la zona de pie de la ladera. Suelen darse principalmente en frentes rocosos verticalizados.

Se describen dos tipos de volcamientos según Goodman y Gray (1976) citado en Hungr et al. (2014):

Volcamiento de bloques: Se produce un movimiento en donde predomina la rotación, esto implica el volcamiento de columnas o placas de roca, ya sea una o varias, las cuales están divididas por juntas de inclinación pronunciada. Estas rocas poseen una estructura relativamente compacta, la rotación se produce sobre discontinuidades basales bien definidas. El movimiento puede comenzar lentamente, pero la última etapa de la falla puede ser extremadamente rápida. Ocurre a todas las escalas.

Volcamiento flexural: Se presenta un movimiento donde la roca experimenta flexión y rotación, esta masa rocosa se caracteriza por estar poco espaciada entre ella, con un ángulo de inclinación pronunciado y que se disponen perpendicularmente a la dirección en que la pendiente cae. La consistencia de la roca es relativamente frágil y propensa a la fisibilidad. El movimiento suele ser lento y tiende a autoestabilizarse. Sin embargo, en la zona de deslizamiento rotacional secundario puede desarrollarse en la zona de bisagra del derrumbe. Ocurre a gran escala.

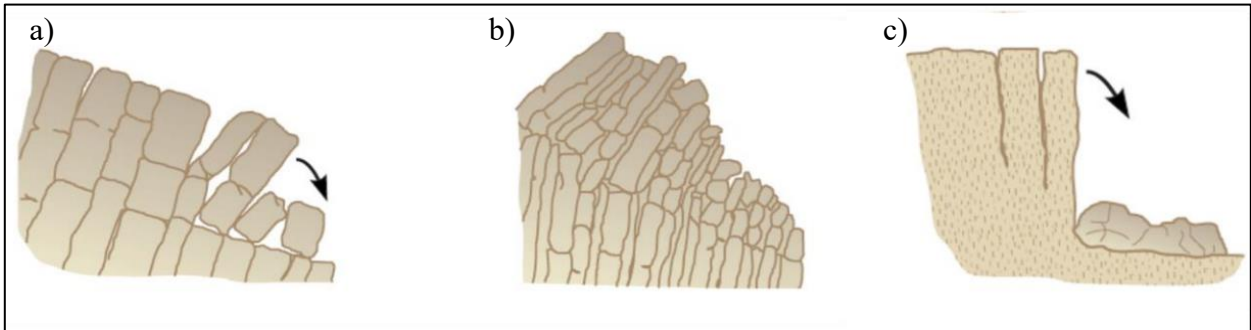


Figura 3.2: Esquemas de volcamientos o topples. a) y b) Volcamientos de rocas en bloques. c) Volcamiento de suelo. Extraído y modificado de González y Ferrer (2011).

3.2.5.3 Deslizamientos

Los deslizamientos son movimientos de masas de suelo o roca que deslizan, moviéndose relativamente respecto al sustrato, sobre una o varias superficies de rotura netas al superarse la resistencia al corte de estas superficies; la masa generalmente se desplaza conjunto, comportándose como una unidad en su recorrido; la velocidad puede ser muy variable.

Los procesos de deslizamiento se subdividen en dos tipos según su tipo de movimiento (Cruden y Varnes, 1996; Hungr et al., 2014)

Deslizamientos rotacionales: son más frecuentes en suelos cohesivos homogéneos. La rotura, superficial o profunda, tiene lugar a favor de superficies curvas o en forma de cuchara. Una vez iniciada la inestabilidad, la masa empieza a rotar, pudiendo dividirse en varios bloques que deslizan entre sí y dan lugar a escalones con la superficie basculada hacia la ladera y a grietas de tracción estriadas.

Deslizamientos traslacionales: la rotura tiene lugar a favor de superficies planas de debilidad preexistentes. No suelen ser muy profundos, aunque sí muy extensos y alcanzar grandes distancias.

Generalmente, los deslizamientos traslacionales son más rápidos que los rotacionales, dadas las características cinemáticas del mecanismo de rotura.

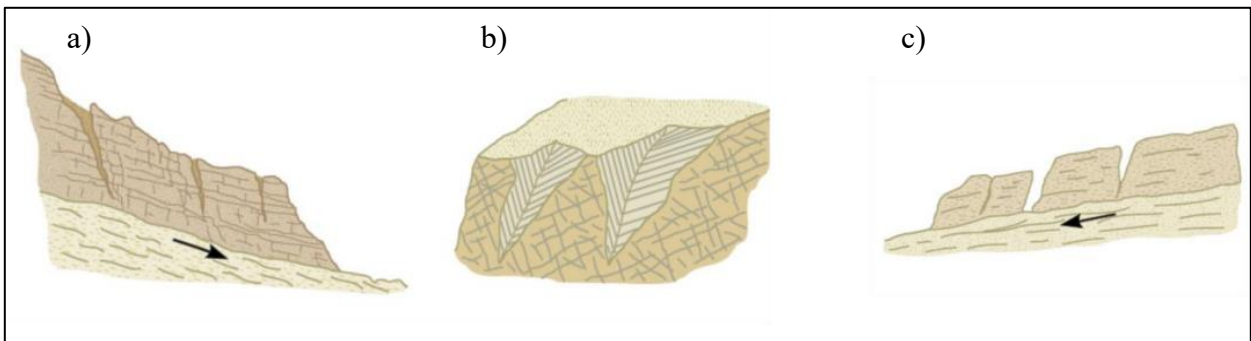


Figura 3.3: Esquema de deslizamientos traslacionales. a) y b) Deslizamiento de roca. c) Deslizamiento de suelo. Extraído y modificado de González y Ferrer (2011).

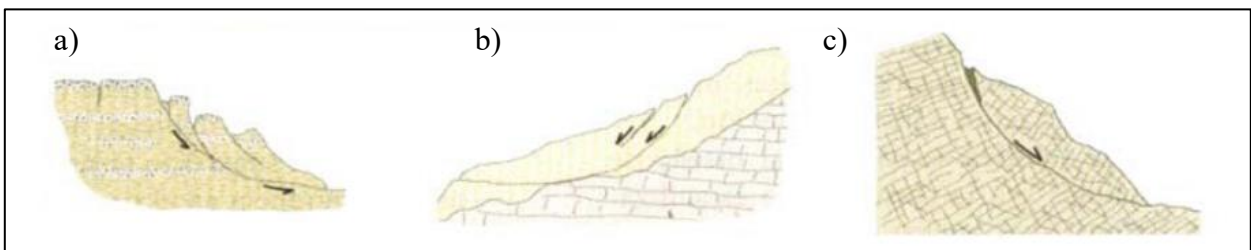


Figura 3.4: Esquema de deslizamiento rotacionales. a) y b) Deslizamiento de suelo. c) Deslizamiento de roca. Extraído y modificado de González y Ferrer (2011).

3.2.5.4 Flujos

Los flujos o coladas son movimientos de masas de suelo (flujos de barro o tierra), derrubios (coladas de derrubios o *debris flow*) o bloques rocosos (coladas de fragmentos rocosos) con abundante presencia de agua, donde el material está disgregado y se comporta como un fluido, sufriendo una deformación continua, sin presentar superficies de rotura definidas. El agua es el principal agente desencadenante, por la pérdida de resistencia, que da lugar en materiales poco cohesivos. Principalmente, afectan a suelos arcillosos susceptibles que sufren una considerable pérdida de resistencia al ser movilizados (González y Ferrer, 2011)

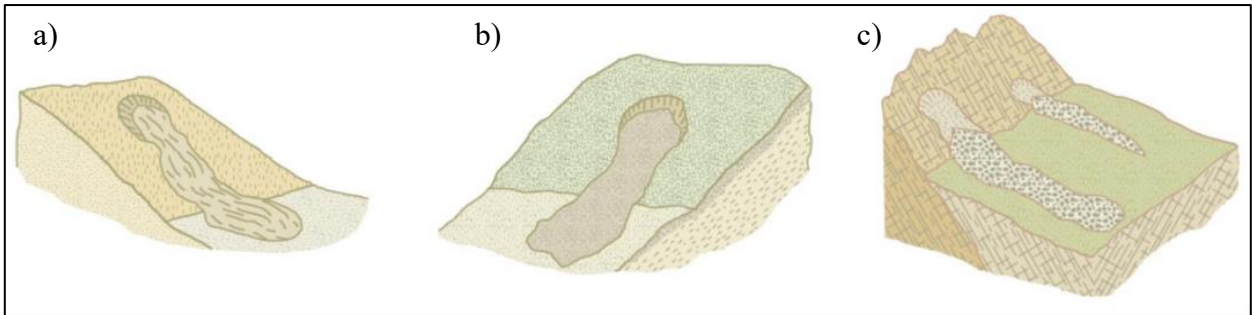


Figura 3.5: Esquema de flujos en distintos materiales. a) Flujo de tierra o lodo. b) Flujo de detritos. c) Avalancha de rocas. Extraído y modificado de González y Ferrer (2011).

3.2.5.5 Extensiones Laterales

Este tipo de movimiento que hace referencia al movimiento de bloques rocosos o masas de suelo muy coherente y cementado, sobre un material blando y deformable. Los bloques se desplazan muy lentamente a favor de pendientes muy bajas. Los movimientos son debidos a la pérdida de resistencia del material subyacente, que fluye o se deforma bajo el peso de los bloques rígidos. Los desplazamientos laterales también pueden ser provocados por licuefacción del material infrayacente, o por procesos de extrusión lateral de arcillas blandas y húmedas, bajo el peso de las masas superiores. Se dan en laderas suaves, y pueden ser muy extensos.

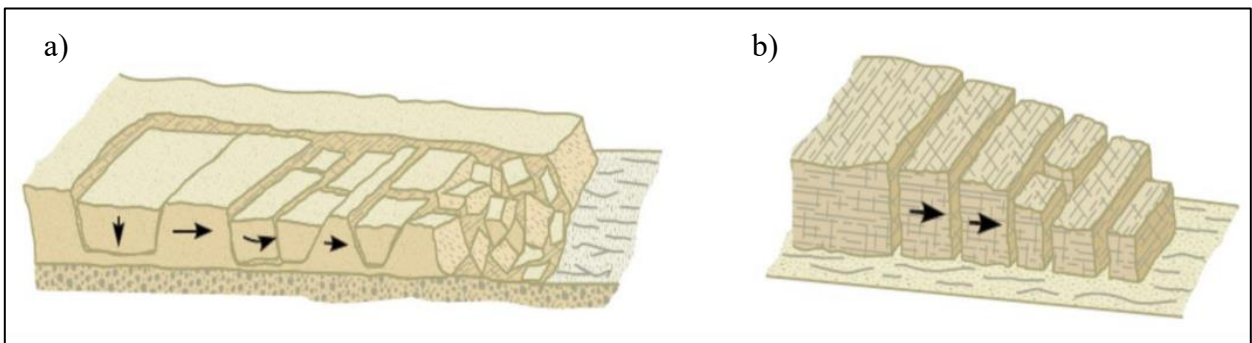


Figura 3.6: Esquema de extensiones laterales. a) Extensión lateral de suelo. b) Extension lateral de rocas o bloques. Extraído y modificado de González y Ferrer (2011).

3.3 Factores condicionantes

Se denomina así a todo factor que pueda generar una situación potencialmente peligrosa, y que por lo tanto controlan la susceptibilidad de generar un fenómeno de remoción en masa. (Campos, 2014). Dentro de los factores condicionantes, las propiedades físicas y resistentes de los materiales (directamente relacionadas con la litología), y las características morfológicas y geométricas de la ladera son fundamentales para la predisposición a la inestabilidad (González y Ferrer, 2011)

3.3.1 Geología

La geología influye en mayor o menor grado en la generación de diversos eventos de remoción en masa. Entre los factores de esta categoría se cuentan el tipo de depósito y el material que lo compone, su densidad, plasticidad, humedad, permeabilidad; la litología de las rocas, su estructura, alteración y meteorización. (Lara, 2008).

3.3.1.1 Litología

La litología es un factor que influirá en la resistencia a la meteorización, la composición y granulometría del material, el adquiere relevancia al ser determinante de las propiedades de resistencia del depósito y su estabilidad en laderas. La plasticidad y humedad de un suelo influirá directamente en su grado de cohesión. Si un suelo fino tiene alta cohesión (como es el caso de arcillas), la presencia de niveles de poco espesor podría generar superficies potenciales de deslizamientos para el material que lo sobreyace. En tanto, un suelo grueso arenoso presenta cohesión dependiendo de la humedad a la que se encuentre (Lara, 2008)

La naturaleza del material de la roca está directamente relacionada con la inestabilidad que esta puede sufrir, presentando diferentes litologías con distinto grado de susceptibilidad potencias ante la ocurrencia de deslizamientos. (González y Ferrer, 2011)

3.3.1.2 Grado de alteración y/o meteorización

Para el caso de rocas o caracterización de partículas mayores en un suelo, la litología es un factor que influirá en la resistencia a la meteorización y alteración de la roca. La presencia de minerales secundarios aceleraría los procesos de meteorización, influyendo de manera relevante en factores como la pérdida de resistencia, facilidad para incorporar agua, expansividad, incremento en la porosidad. (Lara, 2008)

3.3.1.3 Estructuras

Las estructuras comprenden principalmente planos de estratificación, sets de diaclasas, grietas de tensión y fallas, siendo necesario que éstas sean caracterizadas en cuanto a su abertura, relleno y rugosidad. La caracterización estructural en rocas es relevante puesto que se encuentra directamente relacionado con la generación de material detrítico o bloques que conforman zonas potencialmente inestables para ser movilizados. La presencia de diversos sets estructurales y de estructuras que conforman planos de ruptura mayores en la roca podrán permitir la generación de cuñas que representan posibles planos de deslizamiento en las laderas (Lara, 2008)

3.3.2 Geomorfología

Los rasgos geomorfológicos que condicionan eventos de remoción en masa son principalmente la topografía, pendientes de las laderas, cambios fuertes de pendientes de las laderas y la extensión y altura de las laderas. Estas características inciden en la velocidad, energía y volumen de las remociones que puedan originarse (Lara, 2008)

3.3.2.1 Elevación

El material que se encuentra a mayores alturas es mucho más propenso a ser erosionado por la actividad fluvial y por tanto a ser evacuado a través de rápidas descargas a lo largo de las quebradas (Chen et. al, 2011).

3.3.2.2 Pendiente

La topografía escarpada y ángulos altos de pendientes de laderas es el primer factor geomorfológico a considerar, siendo propicios principalmente para la generación de flujos, deslizamientos y derrumbes. (Lara 2008)

Una pendiente más pronunciada produciría una mayor fuerza de deslizamiento a lo largo de la ladera y sería propensa a sufrir perturbaciones por terremotos o por la fuerza del agua (Chen, 2011)

3.3.2.3 Orientación de la ladera

La orientación de las laderas, directamente relacionada con su exposición al sol, influye en la acumulación de humedad en el suelo y por lo tanto en el grado de meteorización y erosión, saturación y presencia de vegetación (Lara ,2008)

3.3.2.4 Forma de las laderas

Por lo general, las laderas convexas son más estables, ya que dispersan la escorrentía de forma más uniforme a lo largo de la pendiente, mientras que las laderas cóncavas se consideran potencialmente inestables, ya que concentran el agua en el punto más bajo y contribuyen a la acumulación de una presión hidrostática adversa. (Kayatsha, 2013)

Específicamente, la curvatura de perfil corresponde a la variación de pendiente en la dirección paralela a la pendiente máxima (Fig. 3.7) y tiene efecto en la aceleración y desaceleración del flujo del drenaje, que afectan la capacidad de infiltración y escorrentía del terreno y a su vez influyen en los procesos de erosión o sedimentación (IDEAM, 2012). Los valores positivos indican que el perfil del terreno es cóncavo hacia arriba, y por lo tanto tiende a desacelerar el flujo y disminuir su energía. Se estima que la consecuente disminución en la capacidad erosiva del flujo favorece los procesos de sedimentación y acumulación de material, además de un aumento en la infiltración y saturación del terreno. Por otro lado, los valores negativos indican un perfil convexo hacia arriba, que tiende a acelerar el flujo del drenaje y los procesos de erosión.

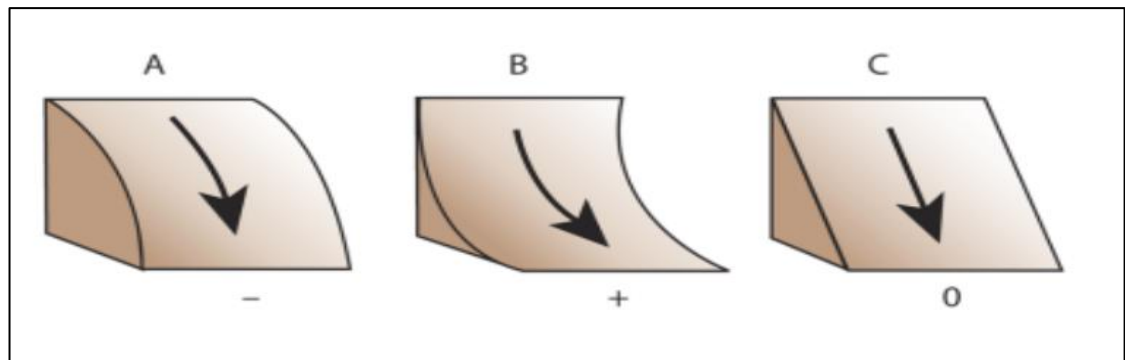


Figura 3.7: Esquema curvatura de perfil.

3.3.2.5 Cercanía a redes de drenaje

La red de drenaje, las posiciones y variaciones del nivel freático, caudales, coeficientes de escorrentía y coeficientes de infiltración, son factores hidrológicos e hidrogeológicos que condicionan la generación de remociones en masa ya que están directamente relacionados a la incorporación de agua en los suelos o macizos rocosos. La presencia de vertientes en zonas escarpadas o acantilados contribuye a la infiltración de agua entre las fracturas de la roca, propiciando la separación de éstas y la posterior pérdida de contacto entre las paredes de la roca, que la mantienen estable. (Lara, 2008)

3.3.3 Factor antropogénico y uso de suelo

El control que ejerce el factor humano sobre la estabilidad de laderas es muchas veces primordial en la generación de eventos de remoción en masa. Las actividades que influyen en esto son excavaciones, rellenos, construcción de estructuras, urbanización, cambios en el uso del suelo, extracción de áridos y acumulación de escombros. Estos, entre otros, pueden contribuir tanto a la desestabilización de las laderas producto de la disminución artificial de la resistencia del material,

como a la contribución de material para ser movilizados por futuros eventos y cambios en la escorrentía superficial y en la topografía. (Lara, 2008)

3.4 Factores desencadenantes

Los factores desencadenantes provocan la rotura una vez que se cumplen una serie de condiciones. Estos últimos son factores externos que actúan sobre los suelos o macizos rocosos, modificando sus características y propiedades y las condiciones de equilibrio de la roca. (González de Vallejo y Ferrer, 2011). Entre los agentes desencadenantes más comunes de remociones en masa se cuentan principalmente las lluvias de gran intensidad y los sismos; secundariamente las erupciones volcánicas, la intervención antrópica, la fusión de nieve, la erosión de canales, entre otros. (Lara, 2008)

3.4.1 Precipitaciones

Las precipitaciones, son consideradas uno de los factores desencadenantes de remociones en masa más importantes, condicionan la estabilidad del macizo, al disminuir la resistencia de las estructuras al incorporar agua entre las fracturas del macizo y/o la estructura del suelo, disminuyendo el coeficiente de roce y el esfuerzo efectivo.

Así se tiene que precipitaciones de poca intensidad en periodos prolongados de tiempo y precipitaciones de gran intensidad en periodos cortos de tiempo podrían desencadenar eventos de remociones en masa en zonas donde el escenario sea favorable para ello. Dentro de este aspecto, las precipitaciones cortas e intensas serían susceptibles a provocar eventos superficiales, en tanto remociones más profundas serían provocadas por eventos distribuidos en largo periodo de tiempo (Lara, 2008)

3.4.2 Sismos

Los sismos son factores desencadenantes de remociones en masa en diversos escenarios geológicos y topográficos. Las aceleraciones sísmicas generan un cambio temporal en el régimen de esfuerzos al que está sometido la ladera, tanto normales como de corte, pudiendo producir su inestabilidad. Los tipos de remociones más abundantes generados por terremotos corresponderían a caídas de rocas, deslizamientos desagregados de suelos con pendientes de laderas $>15^\circ$ y deslizamientos de roca con pendientes de laderas $\geq 40^\circ$ (Lara, 2008)

3.4.3 Actividad antropogénica

El grado de intervención antrópica presente en el área también puede formar parte de los factores gatillantes de fenómenos de remociones en masa en la zona, esta intervención incluye cortes artificiales de laderas con alta pendiente, además de obstrucción de canales de drenaje y utilización de relleno como fundación de las obras construidas en el área, y podrían ser principales desencadenantes de mecanismos de caídas de roca, aunque también dadas las condiciones de meteorización de las unidades presentes en el área, podrían provocar deslizamientos de suelo. (Campos,2014; Lara, 2008)

4. METODOLOGÍA

El trabajo a desarrollar consta de tres diferentes etapas, las cuales se complementarán entre ellas para generar un resultado que sea coherente.

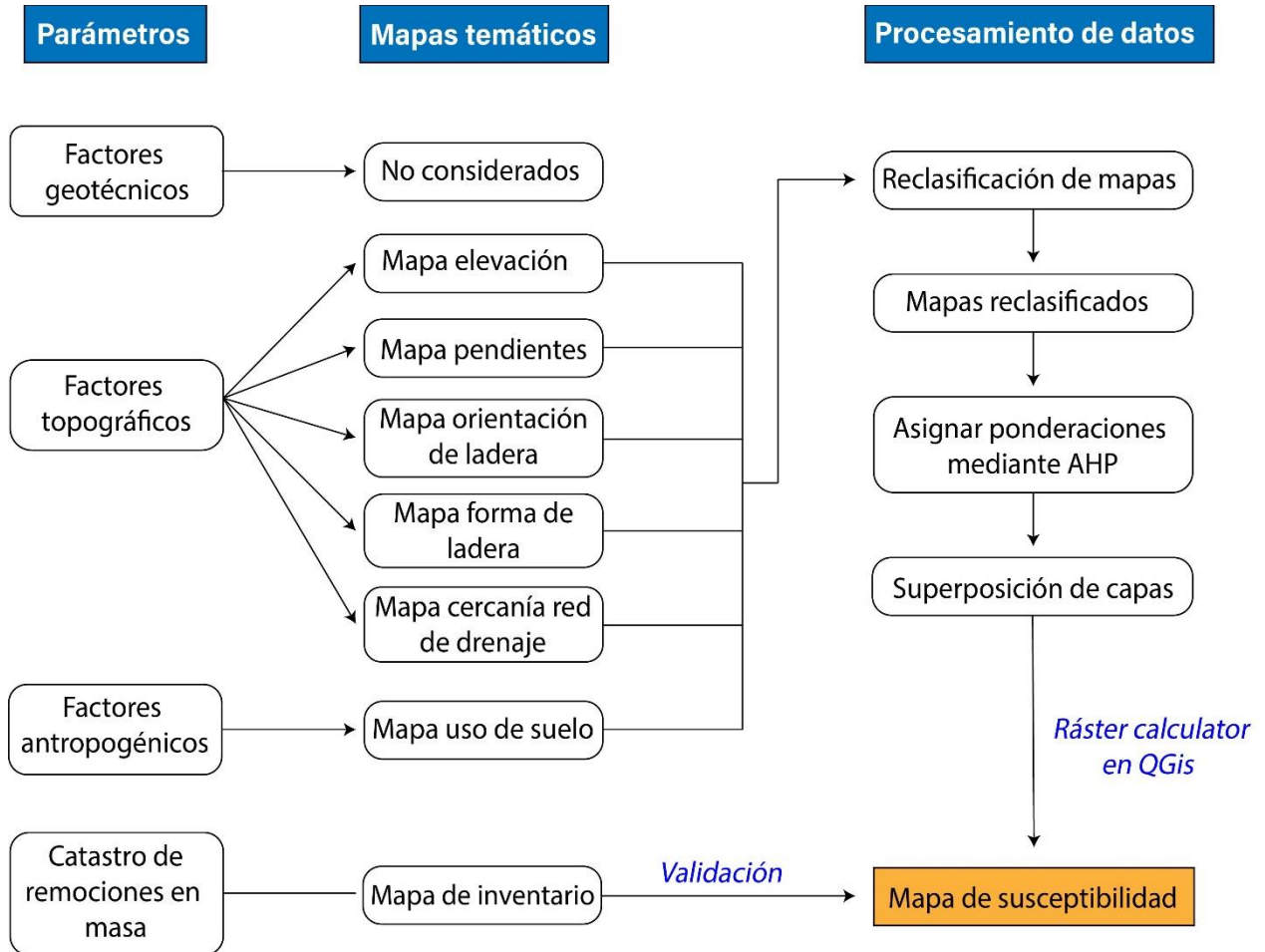


Figura 4.1: Mapa conceptual de procedimiento utilizado para la generación de resultados.

4.1 Etapa Gabinete 1

Dentro de esta etapa, se realiza una recopilación y revisión bibliográfica de los antecedentes del área de estudio, tanto, así como la geología, rasgos geomorfológicos, sus características hidrológicas y procesos de remociones de masa identificados en el tiempo. Además, se incluye el análisis mediante imágenes satelitales y topografía DEM (MINVU, 2013), con resolución espacial de 5 m por celda, orientado al reconocimiento de remociones en masa cercanos a núcleos urbanos. Estos datos son procesados por el software QGIS 3.28.

4.2 Etapa Terreno

En esta etapa se realizan salidas a terreno para poder identificar, caracterizar y fotografiar puntos asociados a remociones en masa, que fueron previamente identificados mediante el análisis de imágenes satelitales y antecedentes bibliográficos. Las salidas a terreno se efectuaron los días 6 de octubre y 16 de noviembre del año 2023.

Para poder identificar y caracterizar estos procesos de remociones en masa se utiliza la ficha adjunta en el Anexo B del presente documento.

4.3 Etapa Gabinete 2

En esta etapa se acopla la información recopilada en terreno y en bibliografía del área de estudio, para así finalmente generar mapas temáticos reclasificados y ponderarlos para así elaborar un mapa de susceptibilidad de la zona mediante el método de Proceso Analítico Jerárquico (AHP.) (Saaty, 2008) y Método de ponderación de mapas temáticos WLC, todo esto mediante el software QGIS 3.28.

Finalmente, para corroborar la precisión del método, se superpone el inventario de remociones en masa al mapa de susceptibilidad y se determina la correlación entre ambos en base a la razón de remociones por unidad de área para cada nivel de susceptibilidad. A continuación, se explican los métodos empleados para la evaluación de susceptibilidad a remociones en masa de la zona, de manera más detallada.

4.4 Selección de la cuenca de trabajo

En primer lugar, se define el área espacial de la cuenca de estudio, para realizar este trabajo, se utilizó el DEM (MINVU, 2013) con resolución de 5 m., este modelo de elevación digital se procesó mediante la herramienta *Landsly* de QGIS 3.28, en la cual mediante el cálculo de los rásters de *fill accumulation* y *flow direction*, se generaron redes de drenaje y a su vez se seleccionaron puntos de inicio en estas redes de drenaje para la formación de la cuenca. Por consiguiente, se escogieron redes de drenaje pertenecientes al estero Nonguén y las redes de drenaje perteneciente a el sector Palomares, por lo tanto, la zona de estudio quedó definida por la cuenca de Nonguén y la subcuenca de Palomares hacia el sector este.

4.5 Evaluación de la susceptibilidad a remociones en masa

Existen muchos métodos y modelos para evaluar la susceptibilidad y el peligro de las remociones en masa. En general, se pueden clasificar en primera instancia como cualitativos o cuantitativos. Los enfoques cualitativos incluyen principalmente métodos heurísticos, mientras que los métodos cuantitativos generalmente incluyen el análisis numérico de los inventarios de deslizamientos, modelos estadísticos y modelos basados en la física. Para este estudio se utiliza el análisis de tipo heurístico. Los métodos heurísticos, se basan en el criterio de expertos que clasifican las zonas de amenaza en el mapa, por lo que están sujetos a la subjetividad de los expertos.

Se utiliza el método de evaluación multicriterio (MCE) para la cartografía de la susceptibilidad a las remociones en masa. Este es un procedimiento de apoyo a la toma de decisiones para obtener una resultante compuesta única mediante el uso de un conjunto de parámetros en los eventos. MCE combina estos criterios para construir un único resultado. Este resultado final se obtiene asignando valores de peso a cada atributo. Además, la opinión de los expertos, el escenario sobre el terreno, la variabilidad local de la geología y uso de suelo adquieren importancia en este método. Existen varios métodos utilizados en la MCE, principalmente de naturaleza cualitativa, como el Proceso Analítico Jerárquico (AHP por su sigla en inglés; Saaty 1990) y la combinación lineal ponderada (WLC). Los cuáles serán utilizados en el análisis de susceptibilidad del área.

A continuación, se listan los métodos a utilizar para la elaboración del mapa de susceptibilidad de remociones en masa:

4.5.1 Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

El AHP es una teoría de cálculos mediante comparaciones por pares de diferentes factores y basada en los juicios de expertos para obtener escalas de prioridad (Saaty 2008). Consiste en una comparación matricial por pares de los factores que contribuyen a las remociones en masa. Para este estudio, en una matriz de comparación por pares, cada factor se calificó entre 1 y 9 frente a cada factor de intersección, cuando el factor del eje vertical era más importante que el factor del eje horizontal. A la inversa, cuando el factor del eje vertical era menos importante que el factor del eje horizontal, el valor oscilaba entre $1/2$ y $1/9$ (Saaty 2008). Tanto los valores de ponderación como los de calificación se asignaron mediante el conocimiento de expertos y observaciones sobre el terreno y se calcularon mediante una matriz de comparación por pares utilizando una escala de calificación común. También es necesario que el peso total sea uno. La escala de la matriz de

comparación por pares se muestra en la Tabla 3.1. Para comprender la coherencia de los juicios, también se calculó un coeficiente de coherencia.

Tabla 4.1: Escala de Saaty. Extraída y modificada de Saaty (2008)

Escala	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Dos elementos contribuyen en igual medida al objetivo
2	Importancia débil o leve	Nivel intermedio
3	Importancia moderada	Preferencia leve de un elemento sobre el otro. La experiencia y el juicio favorecen ligeramente un elemento sobre otro
4	Importancia un poco más que moderada	Nivel intermedio
5	Fuertemente importante	Preferencia fuerte de un elemento sobre otro. La experiencia y el juicio favorecen fuertemente un elemento sobre otro.
6	Importancia fuerte	Nivel intermedio
7	Importancia muy fuerte o demostrada	Preferencia muy fuerte y favorecida de un elemento sobre otro. Demostrado en la práctica
8	Importancia muy muy fuerte	Nivel intermedio
9	Importancia extrema	Preferencia clara y absoluta de un elemento sobre otro.

Una vez definidos los parámetros mediante la tabla anterior, se elabora una matriz de comparación de pares, la cual se define como matriz “A”. Esta matriz tiene un número n de parámetros, por lo cual presenta una dimensión n x n. La comparación de a pares se ejecuta de tal modo que en la fila i (i=1, 2, ..., n) se valora respecto a cada parámetro alterno ubicado en las columnas j (j1, j2, ..., n) de la matriz, por lo tanto, los elementos de la matriz quedan definidos como a_{ij}.

Para el cálculo de las ponderaciones de cada uno de los parámetros utilizados, se debe normalizar la matriz A. Este proceso, requiere calcular el cociente entre cada uno de los elementos individuales a_{ij} de A y la sumatoria de la columna a la cual pertenece dicho elemento. Las ponderaciones finales de cada parámetro estarán dadas por el promedio de los valores pertenecientes a la fila que se corresponde con dicho parámetro. El vector resultante de la operación anterior queda definido como P.

Finalmente, para asegurar de que exista consistencia en los valores se debe calcular el coeficiente de consistencia o consistency ratio (CR), el cual se obtiene mediante la división entre el índice de consistencia (C_i) y el índice aleatorio (R_i)

Para obtener el valor de C_i realiza el siguiente cálculo:

$$C_i = \frac{\text{lamba max} - n}{n - 1}$$

En donde lambda max es la sumatoria del producto entre la matriz A y su vector P y “n” es la dimensión de la matriz.

Para obtener el valor de R_i se realiza el siguiente cálculo:

$$R_i = \frac{1.98 (n - 2)}{n}$$

A partir de las fórmulas y cálculos anteriores se puede calcular el coeficiente de consistencia mediante:

$$CR = \frac{C_i}{R_i}$$

Así, si el resultado de esta ecuación es menor o igual a 0,1, significa que los juicios hechos por los evaluadores y expertos tienen una consistencia aceptable, es decir que sus resultados también son consistentes, en caso de no ser así se debe revisar y corregir la matriz de comparación entre pares.

4.5.2 Selección de los factores condicionantes

La selección de los factores condicionantes utilizados en el estudio se realizó principalmente en función de los factores sobre los cuales se podía obtener información a partir de bibliografía o

recursos disponibles y del trabajo en terreno. También la elección se hizo en base a factores que hayan demostrado importancia en terreno.

Los factores condicionantes utilizados para desarrollar el análisis de susceptibilidad fueron factores topográficos y antropogénicos, mientras que los factores geotécnicos no fueron considerados.

Los factores topográficos incluyen elevación, pendiente, orientación de ladera, concavidad de la ladera y cercanía a redes de drenaje. Los factores antropogénicos se refieren a los diferentes usos de suelo en el área de estudio. Los factores geotécnicos comprenden aspectos litológicos (tipo de roca y grado de alteración) y estructurales (proximidad a fallas), estos factores no fueron considerados debido a que la litología del área de estudio predominantemente similar en toda su extensión, por lo que, al realizar un mapa de ponderación temática con la litología, no habría diferencias de características ni propiedades en él. Para el caso del grado de alteración o meteorización de la roca, este es considerado constante toda la zona, esto debido a que para el alcance del trabajo no es posible realizar un análisis detallado según lo que se pudo observar en terreno. Finalmente, los aspectos estructurales que consideran la proximidad no fueron considerados debido a que no se pudieron identificar fallas presentes en la zona de estudio.

4.5.3 Método de ponderación de mapas temáticos

La técnica de superposición ponderada se define para desarrollar un mapa utilizando superposiciones de varias capas ráster dando peso a cada capa ráster en función de su importancia (Saaty, 1990). El método de superposición ponderada se utilizó para elaborar el mapa de susceptibilidad de remociones en masa de este estudio, ya que es una técnica fiable para este fin.

Se asignan pesos a cada capa ráster según su importancia relativa determinada por la opinión de expertos. Los valores de ponderación y los valores de clasificación de cada uno de los factores que controlan los sucesos se calcularon mediante AHP. Todas las capas ráster se añadieron a la herramienta de superposición ponderada (calculadora de ráster) para el análisis de susceptibilidad después de asignar pesos al modelo. Por último, se obtiene un mapa de susceptibilidad mediante el método de superposición ponderada en la calculadora de ráster utilizando el software QGis.

4.5.4 Reclasificación de factores condicionantes

Para poder contrastar y ponderar la información de los mapas anteriormente mencionados, se necesita definir una escala común que pueda ordenar y comparar los parámetros en cuestión. Estos

datos se reclasifican en una tabla de elaboración propia basada en los trabajos de Mardones y Vidal (2001), Chen et al. (2011), Kayastha et al. (2013), Basharat et al. (2016), Saleem et al. (2020) y Borgomeo et al. (2014) para poder realizarlo.

Los factores condicionantes considerados en el presente análisis de susceptibilidad a remociones en masa toman en cuenta la influencia que tienen en la generación de este y la reclasificación de cada factor en tres clases que representan la susceptibilidad relativa del factor a generar desprendimientos de material, asignando el valor 1 a zonas con baja susceptibilidad, 2 a susceptibilidad moderada y 3 a alta susceptibilidad.

4.5.5 Generación de mapas ráster reclasificados

Se generan los mapas ráster de cada uno de los factores condicionantes seleccionados anteriormente, esto mediante la utilización de un modelo de elevación digital (DEM) de la zona de estudio y las herramientas GDAL y GRASS en el apartado de análisis de ráster del programa QGis, el cual nos facilita la elaboración de estos resultados.

4.5.6 Matriz de comparación entre pares

Una vez seleccionados los factores condicionantes y generados los mapas ráster reclasificados que se utilizaran para el análisis de susceptibilidad, se elabora la matriz de comparación entre pares, la cual es la que asigna las ponderaciones correspondientes a cada factor condicionante. En este estudio se consultó a cuatro expertos en el tema, los cuales generaron una matriz de comparación de pares cada uno (Anexo x), y además se generó de manera autónoma la misma matriz. Los resultados de todas las matrices fueron verificados por el cálculo de coeficiente de coherencia, para finalmente elaborar una matriz final coherente con los datos obtenidos anteriormente, todo esto mediante el método de Proceso Analítico Jerárquico (AHP).

4.5.7 Elaboración de mapa de susceptibilidad de remociones en masa

Luego de haber definido las ponderaciones para cada factor condicionante, se elabora un mapa de susceptibilidad utilizando la herramienta de calculadora de ráster en el programa QGis, en el cual a cada factor condicionante se le asigna la ponderación ya definida. Esto fue realizado mediante el método de ponderación de mapas temáticos WLC, como se explicó anteriormente.

4.5.8 Elaboración de mapa de inventario de remociones en masa

La elaboración del mapa de inventario fue hecha a partir de remociones en masa documentadas en el pasado. Esta documentación consiste en recopilar información sobre estos eventos ocurridos, en este caso se utilizará la compilación realizada por Castro et al. (2023), esto se complementará con la información obtenida de las salidas a terreno en la zona de estudio.

4.5.9 Validación del mapa de susceptibilidad

Para validar un mapa de susceptibilidad de remociones en masa, existen distintas formas de realizarlo. Una de ellas, consiste en verificarlos con información de terreno, y además sobre la base de remociones en masa que ocurrieron en el pasado. Así, comúnmente se utilizan mapas de inventario los cuales se contrastan con el mapa de susceptibilidad para observar si existe o no una correlación positiva en términos de posición, número de eventos y las zonas de mayor susceptibilidad (Kayastha et. al, 2013; Saleem et al., 2020). En este trabajo, se utilizó el método del índice del éxito para comprobar que tan bien se ejecuta el modelo. Esta busca determinar qué tan bien el modelo predice remociones en masa (Chung y Fabbri 1999)

Se espera entonces que gran porcentaje de las remociones en masa debieran coincidir con zonas de susceptibilidad media a alta. Este método de frecuencias acumuladas compara los valores de susceptibilidad con la cantidad de remociones. Para esto se reclasifican los pesos para después ordenarlos de mayor a menor y se superponen con el mapa de remociones, cruzando cada clase del mapa reclasificado de susceptibilidad con el catastro de remociones en masa. Con esto se busca comparar la cantidad de remociones o porcentaje de remociones en masa presente en los diferentes rangos de susceptibilidad.

4.5.10 Evaluación del peligro frente a remociones en masa

Es el proceso mediante el cual se determina la posibilidad de que un fenómeno físico peligroso se manifieste, con un determinado grado de severidad en un área determinada. Representa la recurrencia estimada y la ubicación geográfica de eventos probables.

Esta evaluación se basará en que tan bueno es el modelo realizado, según la validación del mapa de susceptibilidad elaborado, además para realizar esta evaluación se tomaron en cuenta eventos de remociones en masa registrados en el pasado.

5. RESULTADOS

5.1 Reclasificación de factores condicionantes

Para la reclasificación de los factores condicionantes, se obtuvo la tabla 5.1 como resultado.

De esta manera, se reclasifican cada uno de los mapas temáticos utilizados según la siguiente escala que presenta tres categorías, las cuales son: baja, moderada y alta susceptibilidad.

Tabla 5.1: Clasificación de niveles de susceptibilidad según factor condicionante. Elaboración propia basada en trabajos anteriores.

Niveles de susceptibilidad	Elevación (m s.n.m.)	Pendiente (°)	Orientación ladera	Forma de la ladera	Cercanía red drenaje (m)	Usos de suelo
Baja	≤ 150	≤ 10	E-O	Plana	>100m	Bosques y terrenos agrícolas.
Moderada	150-200	10-20	S-SE-SW	Convexa	50-100 m	Praderas y matorrales, plantaciones.
Alta	> 200	> 20	N-NE-NW	Cóncava	0-50 m	Áreas Urbanas e industriales.

Las categorías presentadas se pueden caracterizar de la siguiente manera:

La categoría de baja refleja una probabilidad de ocurrencia de remociones en masa casi nula y limitada a la acción de los factores desencadenantes (precipitaciones y sismos), esto se debe a las características que les dan una mayor estabilidad a estos sectores. Para la categoría moderado, existe la probabilidad de que ocurran fenómenos de remociones en masa frente a la acción de factores desencadenantes, pero las zonas afectadas experimentarían un número limitado de remociones en masa. La categoría de alta refleja que ocurrirá un número considerable de remociones en masa en el área, con la presencia de factores desencadenantes débiles o poco intensos, así como también sin la presencia de ellos.

5.2 Mapas temáticos reclasificados

5.2.1 Factores topográficos

5.2.1.1 Elevación

La preparación del mapa de elevación se obtuvo a través del procesamiento del DEM del MINVU, mediante la herramienta relieve en el apartado de análisis de ráster en el software Qgis 3.28, para después ser reclasificadas como se observa en la Tabla 4.1.

Las elevaciones máximas encontradas en el área de estudio son de aprox. 250 m s.n.m. y las alturas mínimas corresponden a nivel del mar., se puede observar que la diferencia de altura es bastante considerable, esto debido a la geomorfología presente en el lugar. Esto conlleva a que lugares con mayor diferencia topográfica sean más propensos a los procesos de remociones en masa.

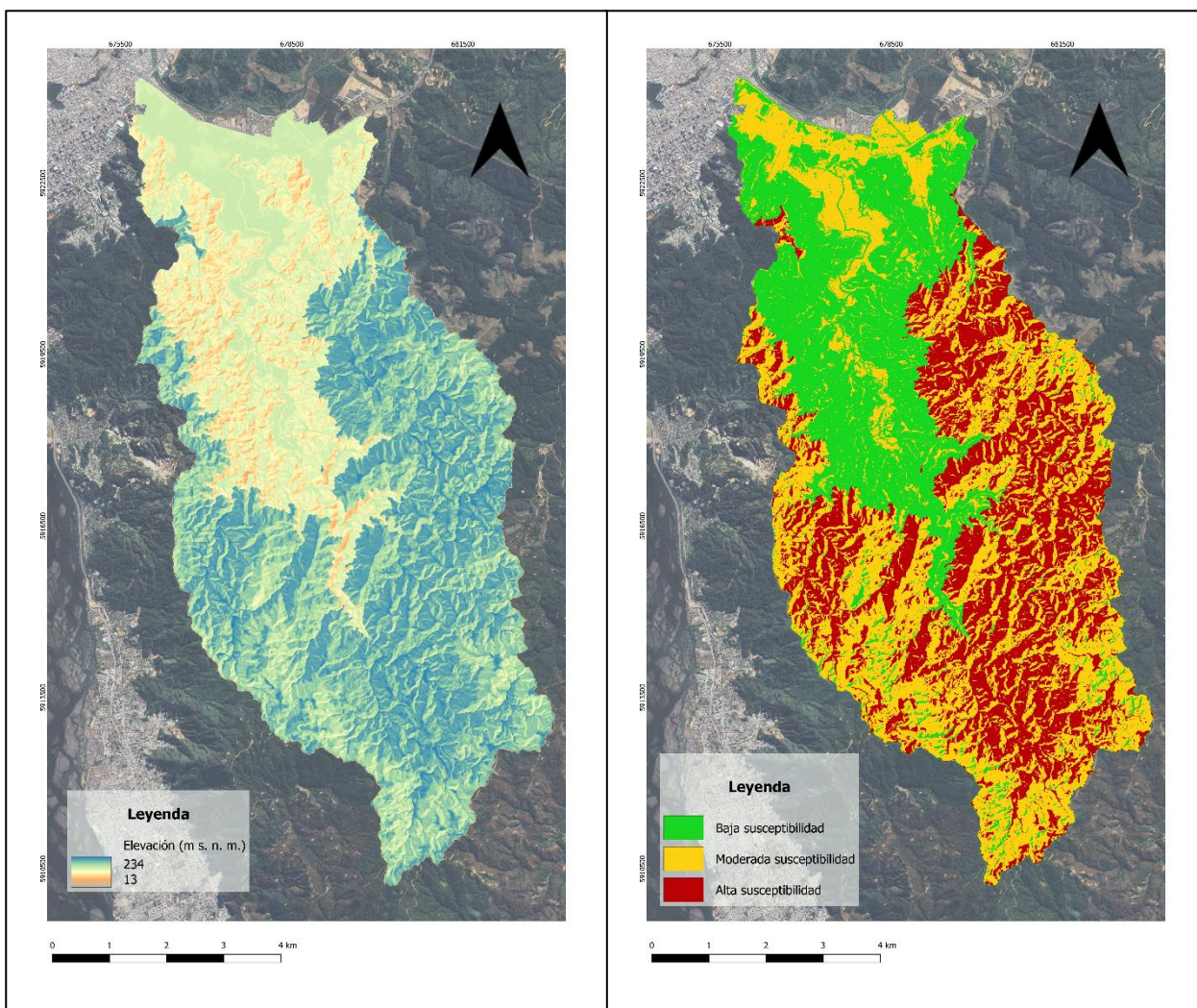


Figura 5.1: Mapa de elevación.

Figura 5.2: Mapa de elevación reclasificado.

5.2.1.2 Pendiente

La preparación de este mapa se obtuvo a través del procesamiento del DEM del MINVU, mediante la herramienta de *Slope* en el apartado de análisis de ráster en el software Qgis 3.28, para posteriormente ser reclasificadas en 3 clases: 0-10°, 10-20° y > 20°. Como se observa en la Tabla 4.1.

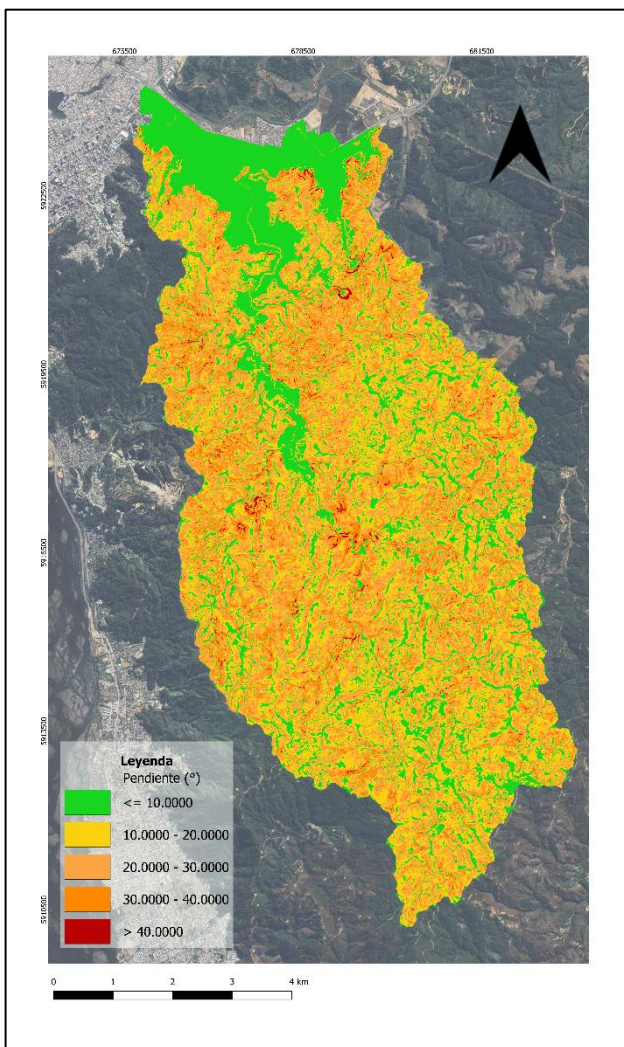


Figura 5.3: Mapa de pendientes.

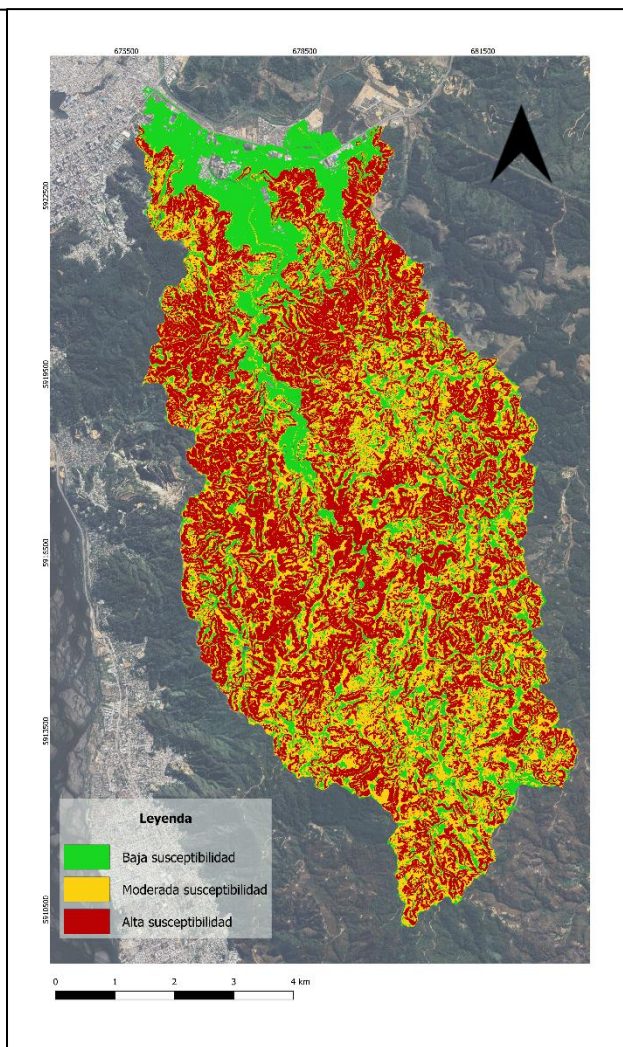


Figura 5.4: Mapa de pendientes reclasificado.

Las pendientes mayores encontradas fueron de 55° grados, predominando principalmente las de 15°, esta diferencia entre los valores queda en evidencia para poder analizar la distribución espacial de las pendientes. La topografía escarpada y ángulos altos de pendientes de laderas son los primeros factores geomorfológicos a considerar para la generación de flujos, deslizamientos y derrumbes.

5.2.1.3 Orientación de ladera

La orientación de las laderas determina la acción de agentes erosivos sobre el terreno y asimismo de la captación de luz solar. La preparación del mapa se obtuvo a través del procesamiento del DEM del MINVU, mediante la herramienta de *Aspect* en el apartado de análisis de ráster en el software Qgis 3.28, para luego elaborar la reclasificación de los parámetros, la orientación solar se clasificó en 9 clases como en los trabajos de Duo et al. (2017) y Basharat et al. (2013): Norte ($337,5^\circ - 22,5^\circ$); Noreste ($22,5^\circ - 67,5^\circ$); Este ($67,5^\circ - 112,5^\circ$); Sureste ($112,5^\circ - 157,5^\circ$); Sur ($157,5^\circ - 202,5^\circ$); Suroeste ($202,5^\circ - 247,5^\circ$); Oeste ($247,5^\circ - 292,5^\circ$), y Noroeste ($292,5^\circ - 337,5^\circ$) como se puede ver en la Figura 5.5.

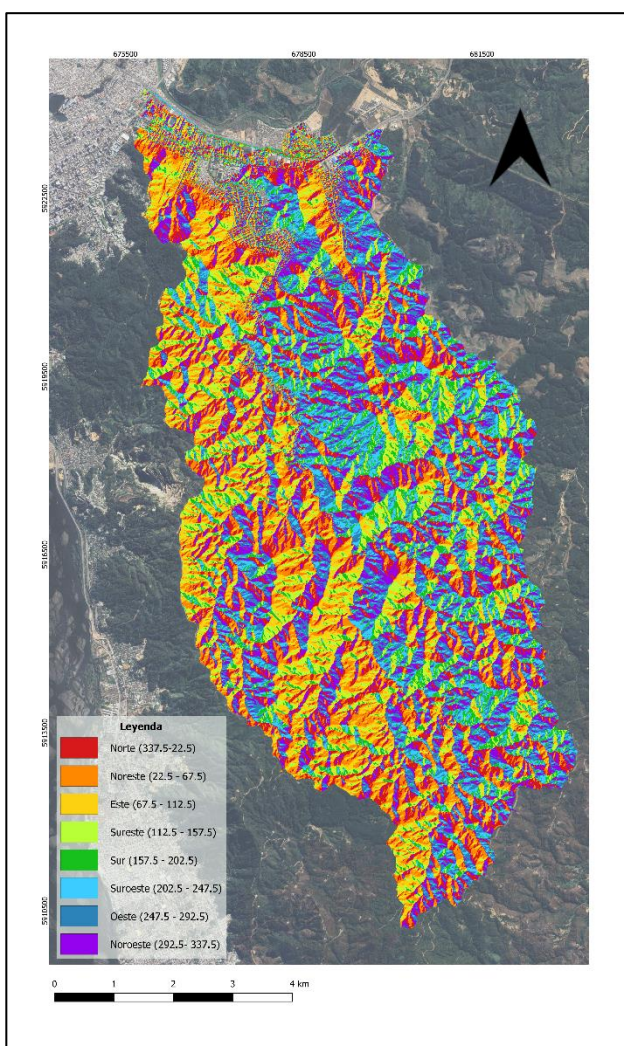


Figura 5.5: Mapa de orientación de laderas.

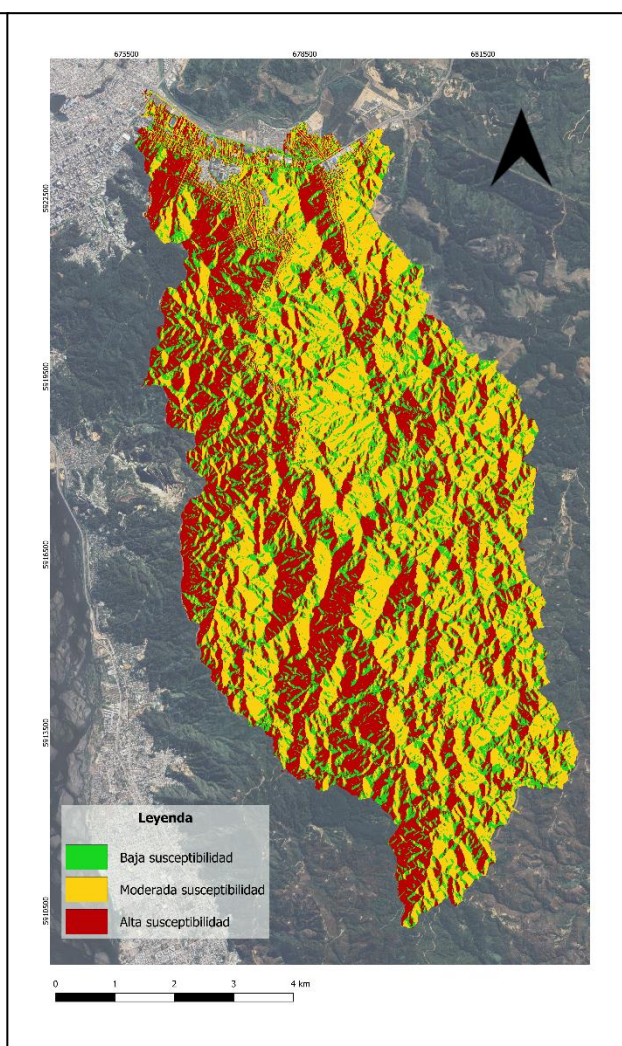


Figura 5.6: Mapa de orientación de laderas reclasificadas.

Posteriormente estos valores fueron reclasificados nuevamente, pero esta vez en los niveles de susceptibilidad presentados anteriormente en la Tabla 4.1, en donde las laderas expuestas de E-O

tienen susceptibilidad baja, las orientadas hacia el sur (S-SE-SW) presentan una susceptibilidad moderada, mientras que las laderas orientadas hacia el norte (N-NE-NW) presentan una susceptibilidad alta, como se ve en la Figura 5.6.

5.2.1.4 Forma de la ladera

La forma de la ladera afecta al aceleración y desaceleración de la escorrentía superficial, por lo general, las laderas convexas son más estables, ya que dispersan la escorrentía de forma más uniforme a lo largo de la pendiente, mientras que las laderas cóncavas se consideran potencialmente inestables. Para la preparación del mapa de forma de la ladera, se obtuvo del procesamiento del DEM del MINVU y se utilizó la herramienta de análisis de terreno y la opción de perfil de curvatura, para luego ser reclasificado en los niveles de susceptibilidad presentados en la tabla 4.1. El valor de la forma de la pendiente se dividió en 3 clases como en Wubalem (2021): 1. Cóncava (< -2); 2. Plana ($-2 - 2$), y 3. Convexa (> 2).

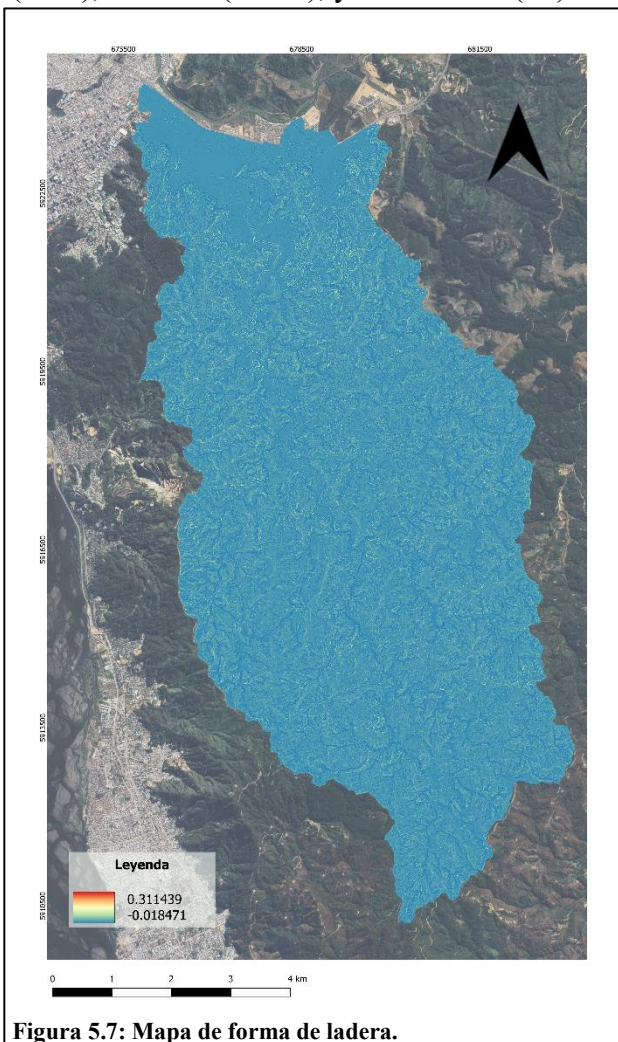


Figura 5.7: Mapa de forma de ladera.

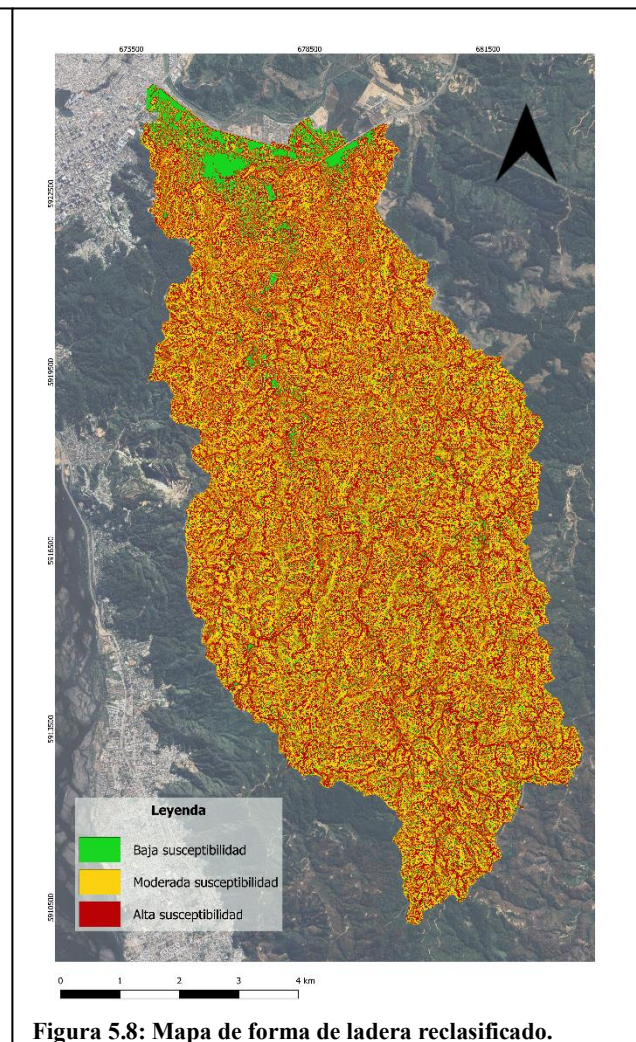


Figura 5.8: Mapa de forma de ladera reclasificado.

5.2.1.5 Cercanía a redes de drenaje

La distancia a las redes de drenaje es considerada un factor importante en los procesos de remociones en masa, esta influye en la fluctuación del nivel freático, lo que conlleva a la reducción de la resistencia de las rocas, y además la presencia de escorrentía superficial aumenta la erosión de las laderas. Para la realización de este mapa se utilizó la herramienta de Proximidad en el apartado de análisis de ráster y consideró un intervalo cada 50 metros como en los trabajos de Kayashta (2013), Basharta (2016) y Duo (2017). Para así después reclasificar los datos como en la tabla 4.1.

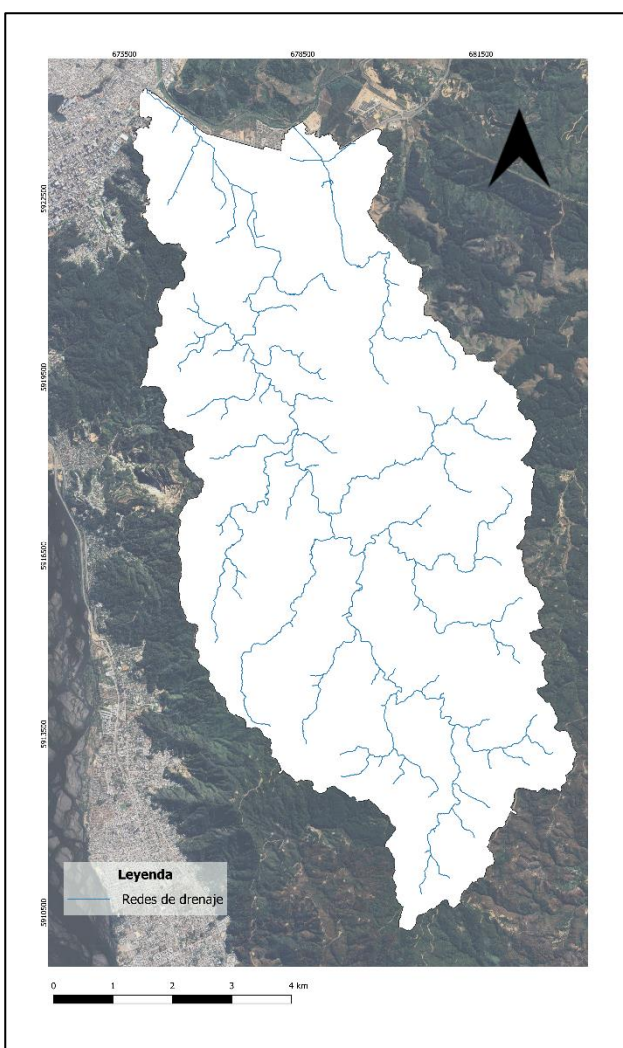


Figura 5.7: Mapa red de drenaje.

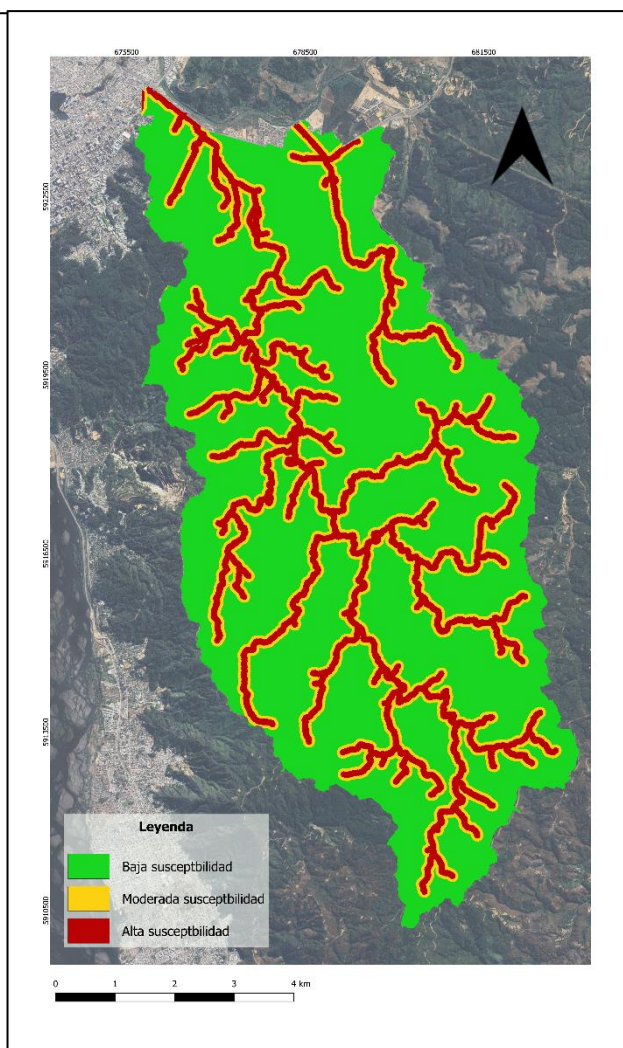


Figura 5.8: Mapa red de drenaje reclasificado.

5.2.2 Factores antropogénicos

5.2.2.1 Usos de suelo

El uso de suelo muestra la presencia o ausencia de urbanización, el tipo de vegetación en áreas no urbanizadas, ausencia de la vegetación o actividades de tipo agrícola o forestal. Cada uso influye sobre la superficie donde se encuentra, por ejemplo, en la capacidad de infiltración del agua en el suelo, facilitando o retrasando la saturación de éste. Los polígonos de usos de suelo fueron extraídos de CIREN (2015).

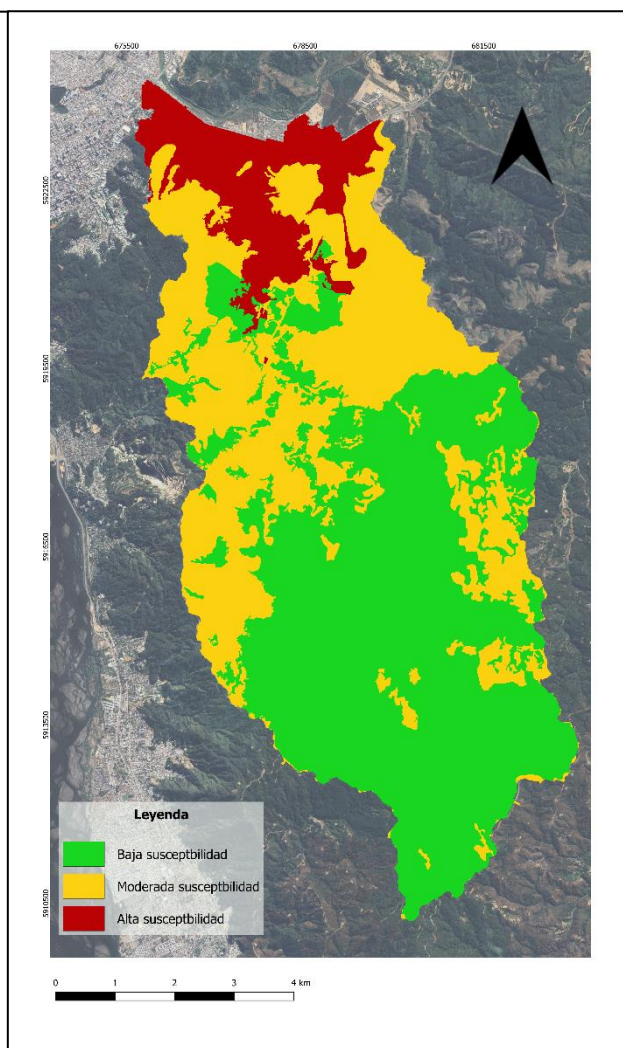
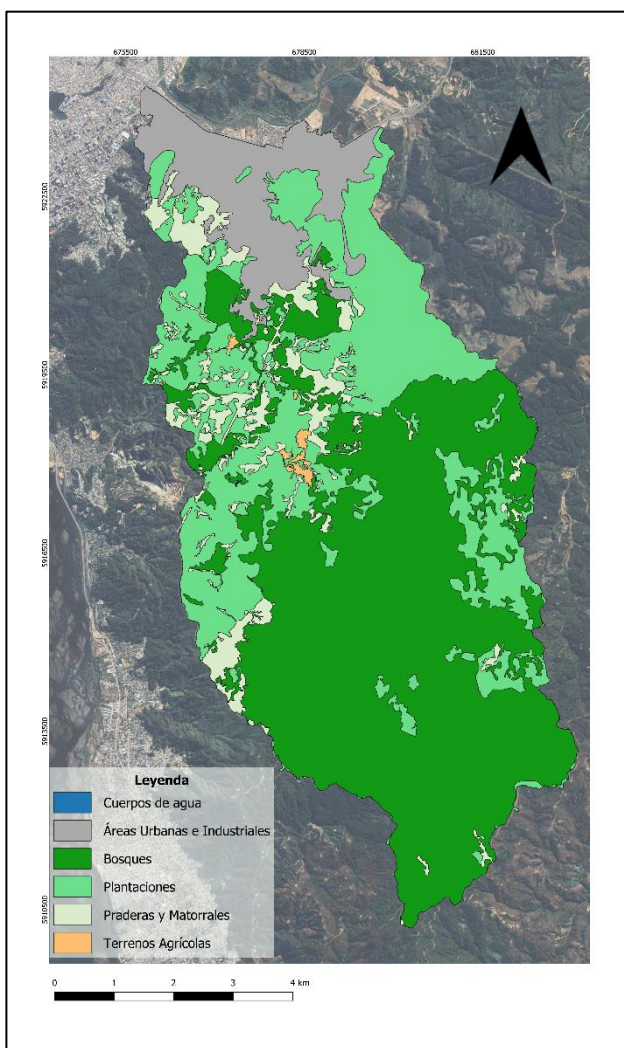


Figura 5.11: Mapa uso de suelo.

Figura 5.12: Mapa uso de suelo reclasificado.

En el área de estudio existen cinco usos de suelo, los cuales son: Áreas urbanas e industriales, bosques, praderas y matorrales, plantaciones (principalmente forestales) y terrenos agrícolas. A estos usos de suelo se les realizó una reclasificación que se muestra en la tabla 4.1. En donde las áreas urbanas predominan con una alta susceptibilidad a los procesos de remoción en masa debido

a la intervención humana que sufren esos sectores. Para el caso de las plantaciones se les considera con una susceptibilidad moderada, debido a la intervención forestal en esos sectores, pero aun así la vegetación sirve para mantener el suelo y la tierra adherido en su lugar. Las praderas y matorrales al vegetación más pequeña y seca, tiende a ser más propensa a remociones en masa, por lo tanto, también caben dentro de la clasificación de susceptibilidad moderada. Como último apartado, los bosques y terreno agrícola son los sectores más seguros, ya que el suelo no está intervenido y además los terrenos agrícolas suelen ser en lugares planos, por lo que junto con los cuerpos de agua son consideradas zonas de baja susceptibilidad.

5.3 Ponderaciones mapas temáticos

Se obtuvo la matriz final (Tabla 5.2) como resultado del promedio de todas las matrices generadas (Anexo A), en la cual se pueden observar las ponderaciones finales para cada factor condicionante representados en los mapas anteriores.

Tabla 5.2: Matriz de comparación entre pares. Se muestran los valores establecidos para cada factor y sus ponderaciones resultantes.

	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	Ponderación resultante
[1] Pendiente	1	6	8	8	4	7	0.49
[2] Uso de suelo	1/6	1	6	6	2	7	0.22
[3] Orientación ladera	1/8	1/6	1	1	1/5	1	0.04
[4] Concavidad	1/8	1/6	1	1	1/5	1	0.04
[5] Cercanía red drenaje	1/4	1/2	5	5	1	5	0.17
[6] Elevación	1/7	1/7	1	1	1/5	1	0.04

Se calcula el coeficiente de coherencia de la tabla según el método explicado en el apartado 4.4.1 y se obtiene el valor de 0.0983, lo que indica que es coherente.

5.4 Mapa de susceptibilidad

El mapa de susceptibilidad del área de estudio se realizó mediante la calculadora de ráster, utilizando todos los mapas temáticos anteriormente presentados y se les dio una ponderación de acuerdo con la Tabla 5.2.

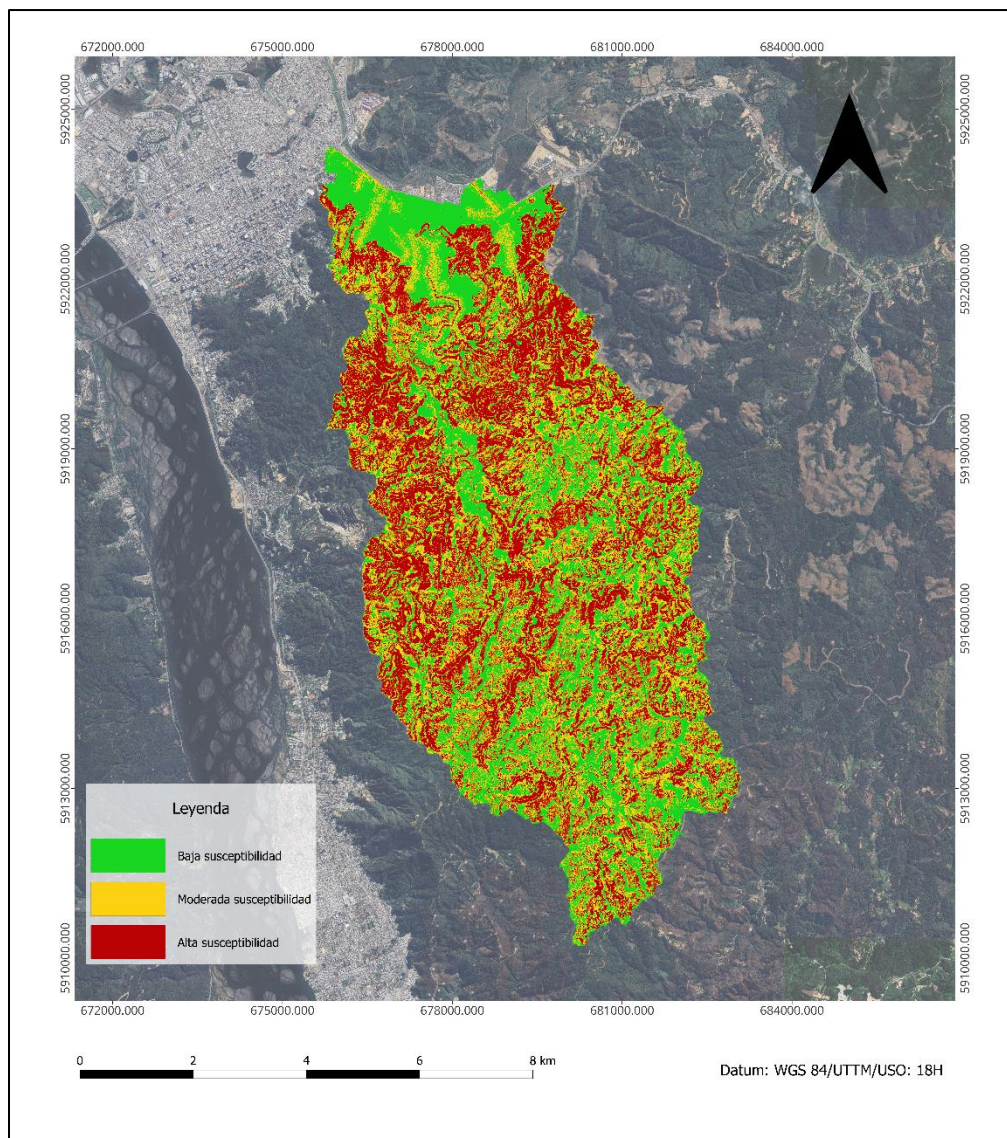


Figura 5.9: Mapa de susceptibilidad. Elaboración propia.

5.5 Inventario de remociones en masa

El mapa de inventario de remociones en masa se elaboró gracias a las salidas a terreno realizadas y la recopilación bibliográfica de remociones en masa de la zona (Fig. 5.14 y Fig. 5.15). Se lograron identificar 54 remociones en masa en terreno y 64 remociones en masa de recopilaciones bibliográficas, cabe destacar que estos puntos también fueron visitados para corroborar si existía aun o no la presencia de este proceso. En la gran mayoría de los puntos el material seguía ahí, mientras que en otros puntos el material ya había sido retirado, así como también se identificaron remociones en masa nuevas. En terreno se lograron observar únicamente remociones en masa de tipo deslizamiento como se puede observar en las Figuras 5.16 a 5.21.

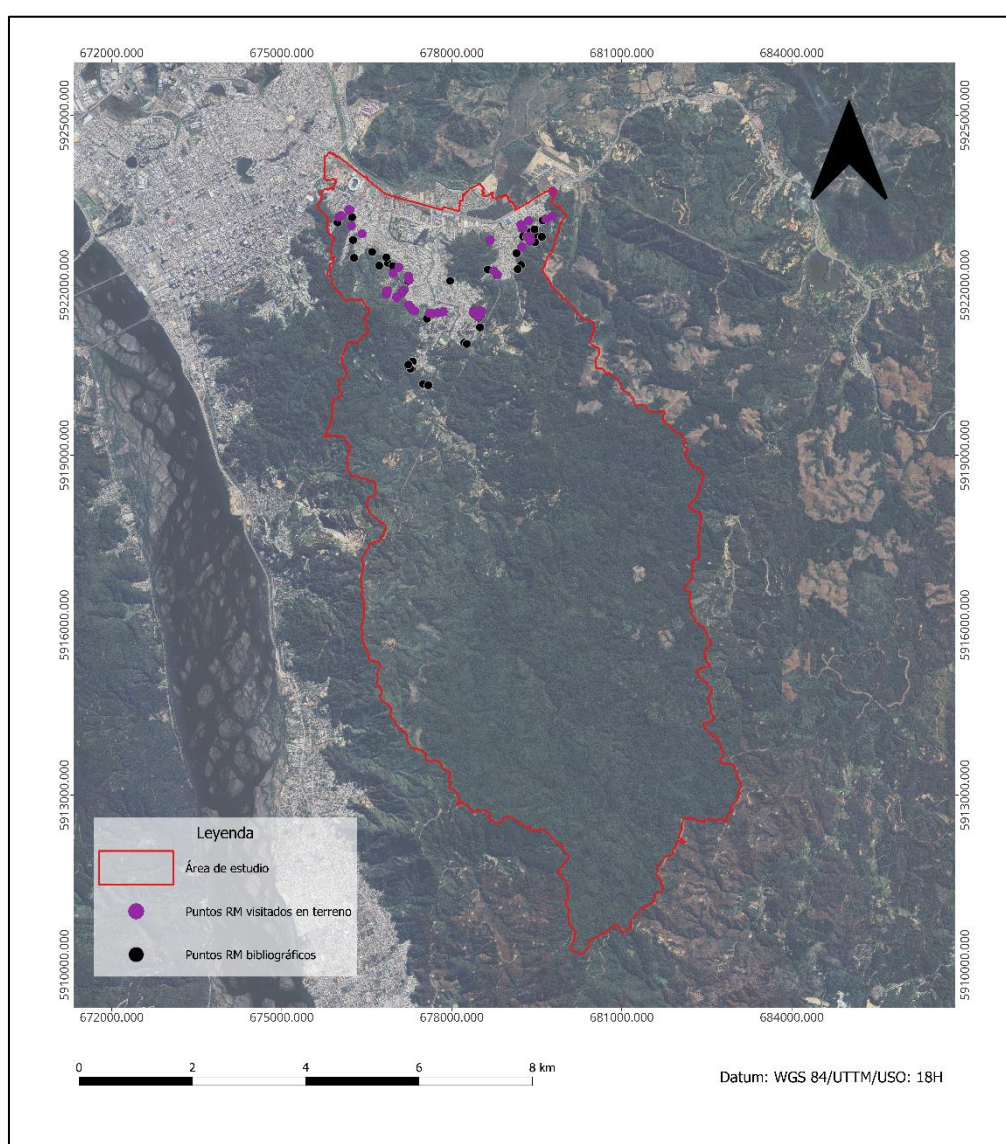


Figura 5.10: Mapa de inventario de remociones en masa.

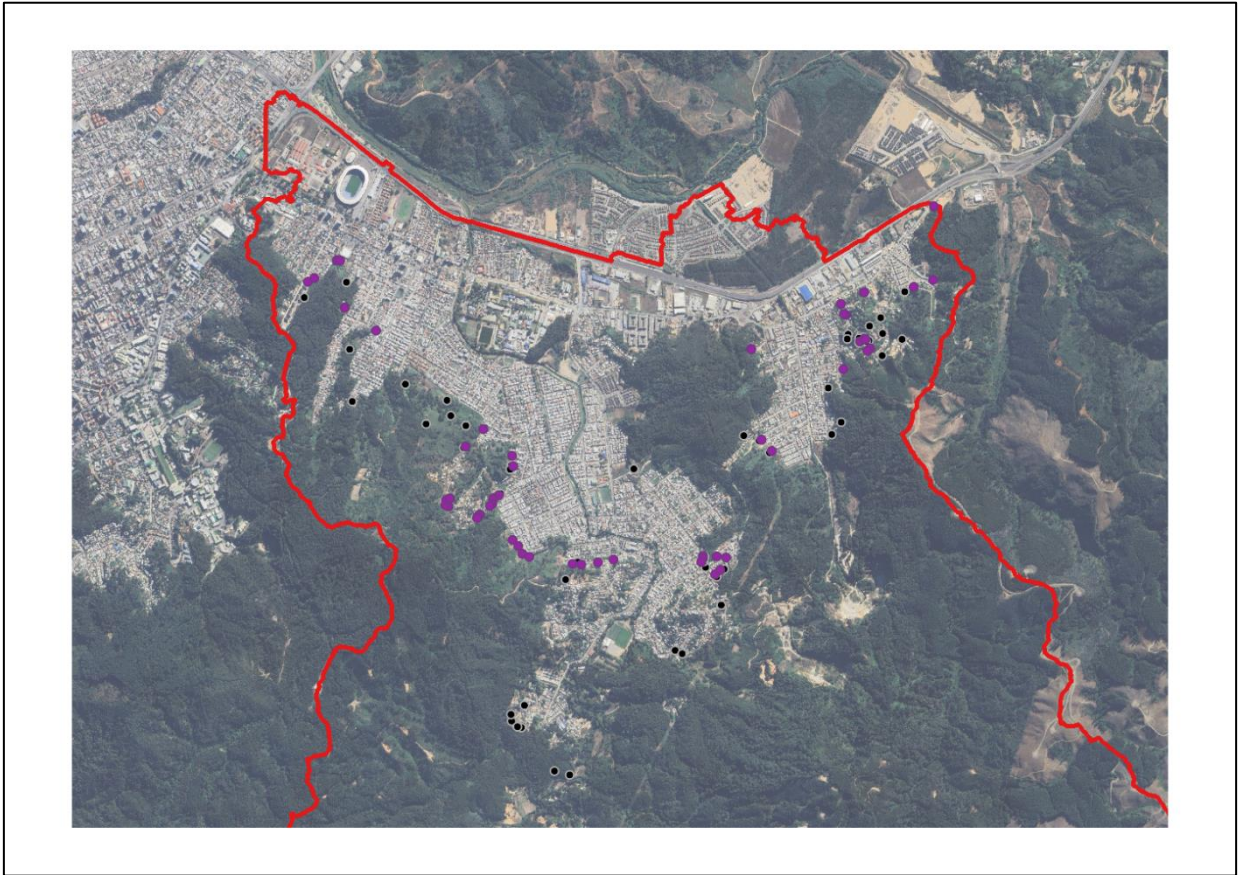


Figura 5.15: Zoom mapa de inventario de remociones en masa.

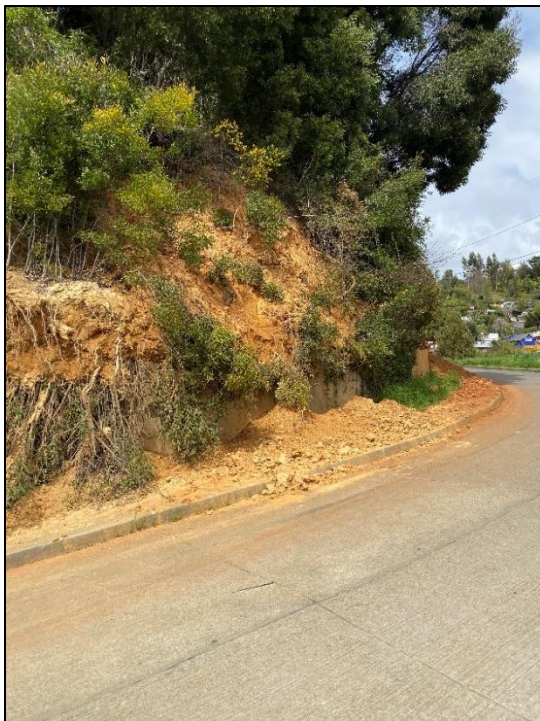


Figura 5.16: Remoción en masa reconocida en sector Nonguén.



Figura 5.17: Remoción en masa reconocida en sector los Lirios Altos.



Figura 5.18: Remoción en masa reconocida en sector Lagos de Chile.

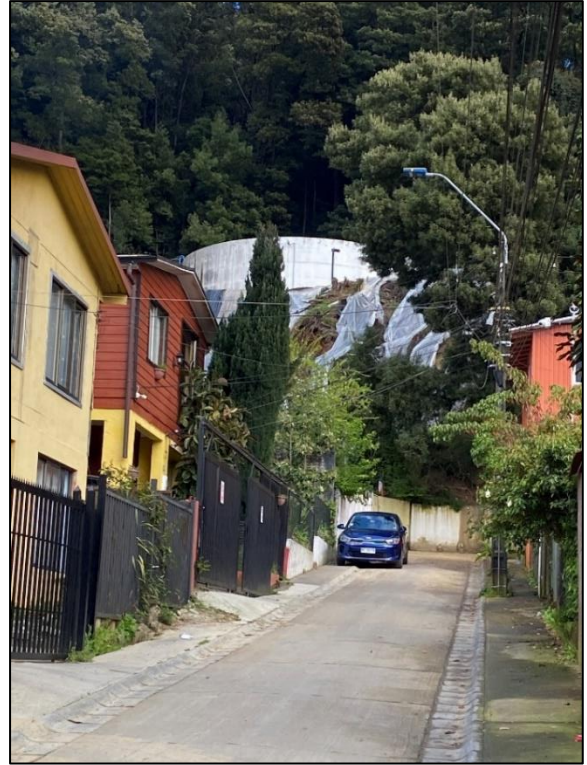


Figura 5.19: Remoción en masa reconocida en sector Lagos de Chile.



Figura 5.20: Remoción en masa reconocida en sector Palomares.



Figura 5.21: Remoción en masa reconocida en sector los Lirios Altos.

6. DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan las discusiones de los resultados obtenidos durante el desarrollo del trabajo, tanto, así como sus alcances y limitaciones.

6.1 Información disponible y mapeo

Para la obtención de información, la resolución de los modelos de elevación digital tiene una considerable influencia en la precisión de parámetros utilizados para el análisis de susceptibilidad. Para este trabajo se utilizó un DEM de resolución espacial de 5 m. (MINVU,2013), por lo tanto, se tienen resultados morfométricos bastante detallados de la zona de estudio, para posteriormente realizar el análisis de susceptibilidad.

Con respecto a la identificación de remociones realizadas, esta información fue obtenida de terreno, lo cual se pudo complementar con los catastros bibliográficos anteriores. Existen sectores en donde no se pudo acceder para realizar el catastro de remociones en masa, principalmente en la zona sur de la cuenca, en donde los accesos son inexistentes o difíciles de visualizar, esto debido a las pendientes pronunciadas y vegetación frondosa, por lo que es bastante probable que haya remociones en masa que no pudieron ser mapeadas en la zona de estudio. Hay que mencionar que las remociones en masa vistas en terreno solo fueron de tipo deslizamiento, mientras que, en bibliografía, se encontraban deslizamientos y flujos, estos flujos no pudieron ser observados en terreno, mientras que la gran mayoría pudieron ser corroborados en terreno. Además, existe cierta incertidumbre de si alguno de estos eventos realmente pertenece a una remoción en masa, esto debido a la falta de evidencia para poder identificarla como tal en terreno. Para poder mejorar este aspecto habría que recurrir a la memoria e historial de los vecinos, para tener un registro de remociones en masa que hoy no existen. Todo esto podría mejorar la calidad del inventario de remociones en masa y el mapeo de ellas.

6.2 Validación mapa susceptibilidad

Para la validación del mapa de susceptibilidad, se realizó un mapa de inventario de remociones en masa en la zona de estudio y este se comparó con el mapa de susceptibilidad elaborado anteriormente. (Fig. 6.1)

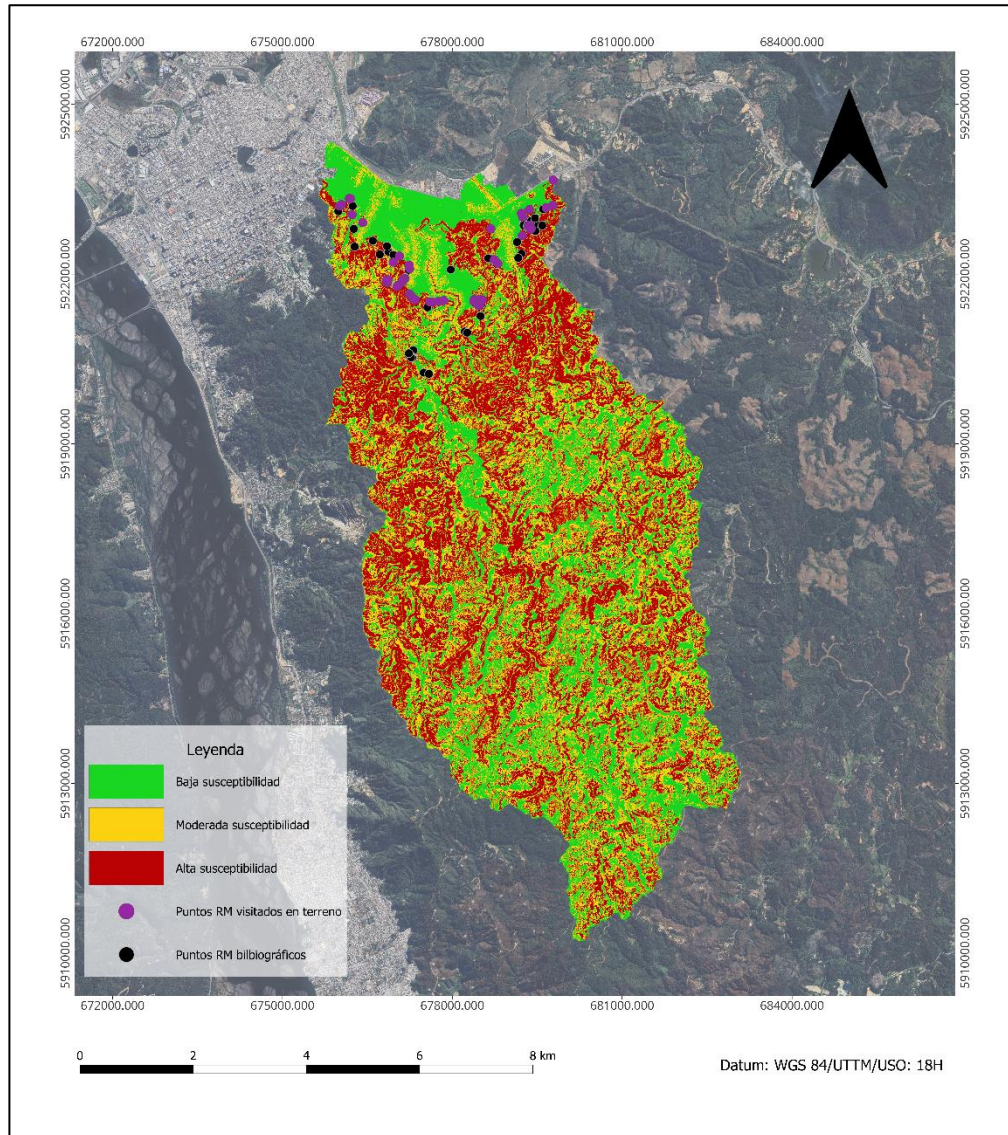


Figura 6.1: Mapa de susceptibilidad intersecado con el mapa de inventario de remociones en masa

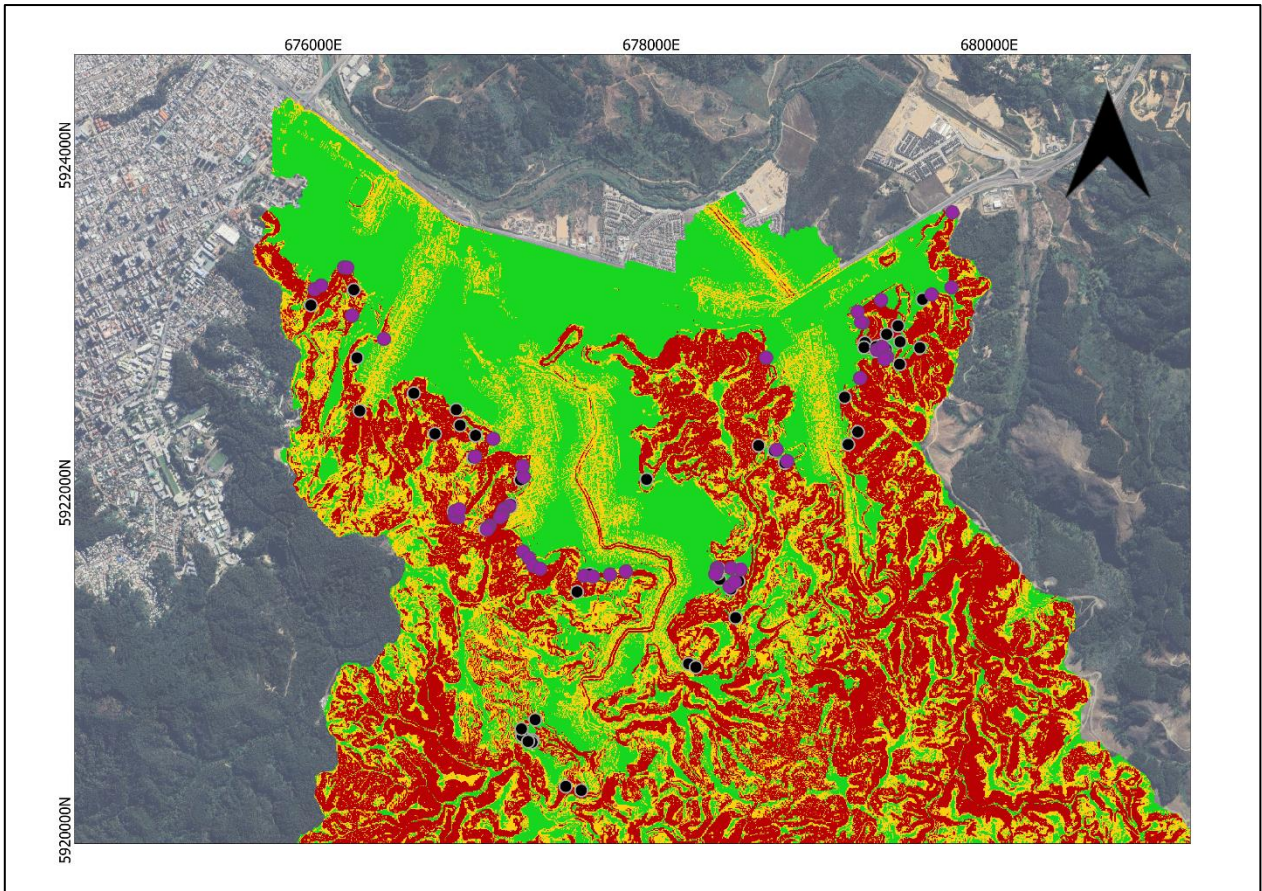


Figura 6.2: Mapa de susceptibilidad intersectado con el mapa de inventario de remociones en masa.

El nivel de validez estará representado por qué tan buena es la correlación espacial entre los eventos registrados durante el trabajo en terreno y trabajo bibliográfico, para esto se elaboraron gráficos para poder visualizar de mejor manera esta correlación. Además, se hizo una distinción en cuanto a las remociones vistas en terreno y a las bibliográficas en relación con su susceptibilidad correspondiente y además se analizan en conjunto.

Para las remociones en masa observadas en terreno se tiene que de las 54 existentes, 34 de estos eventos se encuentran en zonas de alta susceptibilidad, 13 de ellas en la zona de susceptibilidad moderada y 7 de ellas en zonas de baja susceptibilidad. Esto quiere decir que el 63% de estos eventos están relacionados a zonas de alta susceptibilidad, 24% a zonas de moderada susceptibilidad y 13% a zonas de baja susceptibilidad (Fig. 6.2). Finalmente, esto indica que la correlación espacial es bastante buena según el trabajo realizado en terreno.

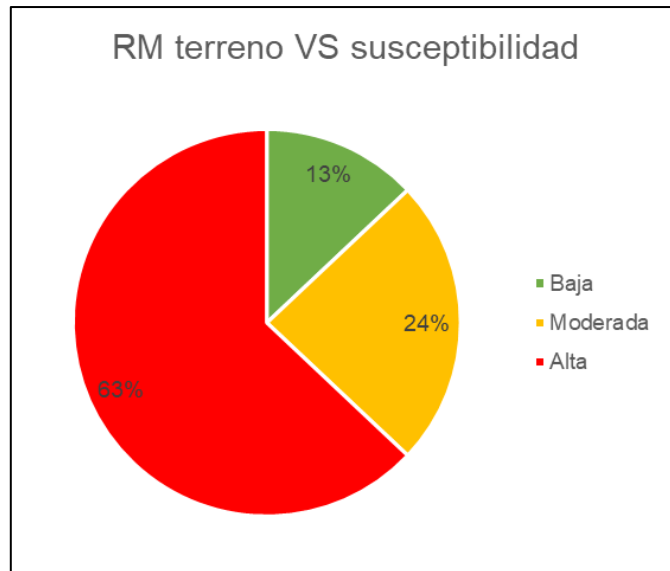


Figura 6.3: Remociones en masa vistas en terreno vs nivel de susceptibilidad

Para el caso de las remociones documentadas por bibliografía y que fueron comparadas con el mapa de susceptibilidad elaborado, se tiene que, de las 64 remociones en masa documentadas, 45 de estos eventos pertenecen a zonas de alta susceptibilidad, 12 de ellas pertenecen a la zona de moderada susceptibilidad y 9 de ellas a zonas de baja susceptibilidad. Esto quiere decir que el 68% de estos eventos están relacionados a zonas de alta susceptibilidad, 18% a zonas de moderada susceptibilidad y 14% a zonas de baja susceptibilidad (Fig. 6.3). Finalmente, esto indica que la correlación espacial es bastante buena según el trabajo bibliográfico.

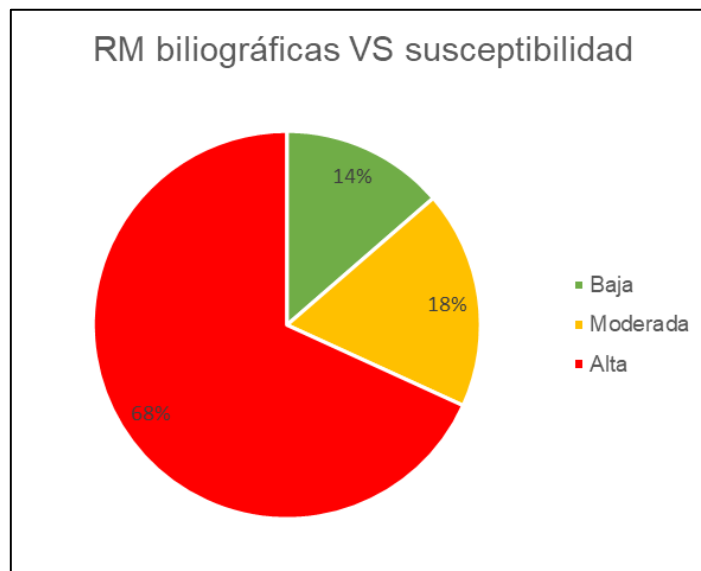


Figura 6.4: Remociones en masa recopiladas bibliográficamente vs nivel de susceptibilidad.

Finalmente, se realizan gráficos con ambos datos, es decir, las remociones en masa observadas en terreno y las recopiladas en bibliografía. Se tiene un total de 118 de remociones en masa registradas, de las cuales 79 pertenecen a la zona de alta susceptibilidad, 25 pertenecen a la zona de moderada susceptibilidad y 14 de ellas a la zona de baja susceptibilidad. Esto quiere decir que el 67% de estos eventos están relacionados a zonas de alta susceptibilidad, 21% a zonas de moderada susceptibilidad y 12% a zonas de baja susceptibilidad (Fig. 6.4). Finalmente, esto indica que la correlación espacial en conjunto entre los datos obtenidos en terreno y por bibliografía son bastante buenos y que se complementan entre ellos, ya que los datos y porcentajes coinciden entre ellos.

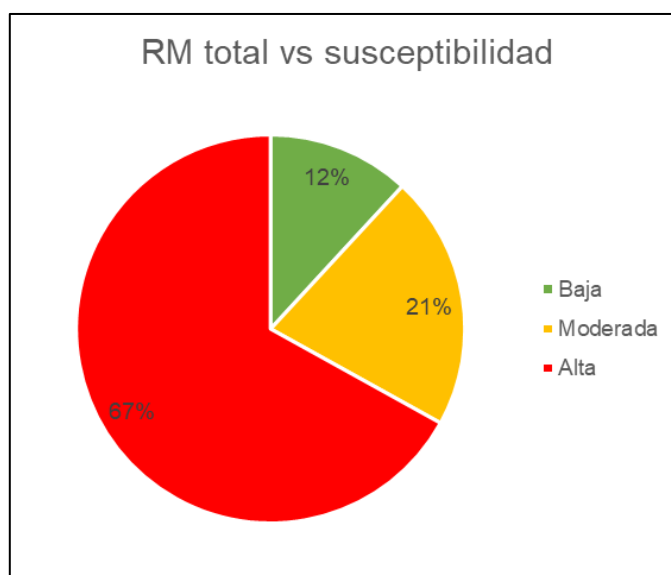


Figura 6.5: Remociones en masa totales vs nivel de susceptibilidad.

6.3 Factores condicionantes

Una variable importante del análisis es la selección y reclasificación de factores condicionantes. Esta se realiza a partir de los datos disponibles en bases de datos y terreno, así como también del criterio de expertos. El mapa resultante cambia en función de los factores escogidos y el número de clases definidos, sin embargo, no existe un acuerdo universal para definir estos parámetros. Por eso para este estudio se decide utilizar la misma cantidad de clases para cada factor, para así tener un resultado más uniforme. El hecho de tener una mayor cantidad de clases podría ayudar a tener un mayor detalle con respecto al comportamiento de cada factor y así mismo tener un resultado más específico.

En el siguiente gráfico (figura 6.6), se observa la correlación entre las remociones en masa registrados y los factores condicionantes seleccionados asociados a un nivel de susceptibilidad correspondiente a cada uno de ellos, a continuación, se realiza un análisis de cada uno de ellos.

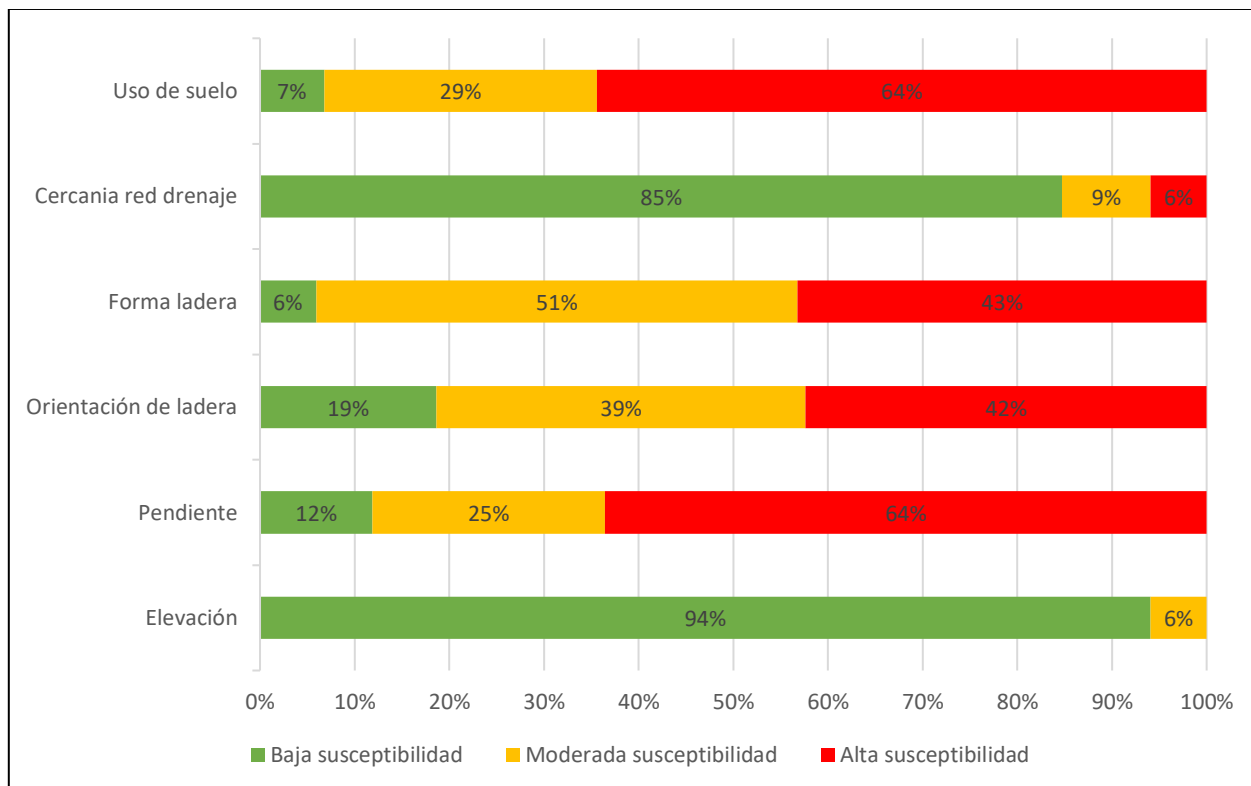


Figura 6.6: Porcentaje de remociones en masa correlacionadas con factores condicionantes asociados a niveles de susceptibilidad.

6.3.1 Geología

Para este trabajo la geología del sector no fue considerada, esto debido a que la zona de estudio presenta una litología predominante y además se pudo corroborar en terreno, que la única litología presente en los puntos de remociones en masa es la del Granitoide Concepción, esto al ser representado en un mapa ráster, para luego ser ponderado con los demás factores no sería representativo, ya que sería solo un factor, es decir, un mapa plano sin diferencias de susceptibilidad.

6.3.2 Grado de alteración y/o meteorización

Se considera que el grado de alteración y/o desarrollo de meteorización probablemente desempeñe un rol en la distribución de las remociones en masa, sin embargo, para el alcance de este trabajo, se considera que la estimación de estos factores en las rocas de la zona es una tarea lenta y que

requiere un estudio más detallado, por lo que se consideró que la alteración era uniforme en toda el área de estudio. Dado que existe poca información disponible de este factor en bibliografía, se considera necesario realizar estudios posteriores de detalle en este aspecto. También es importante mencionar que la roca encontrada en terreno, si presente una alteración de tipo saprolito o “maicillo” (Basso, 2015).

6.3.3 Estructuras

Otro factor que no fue considerado fueron las estructuras geológicas. Este no fue considerado, ya que, en la zona de estudio, principalmente en terreno, no se lograron identificar estructuras tales como fallas y/o diaclasas, que pudiesen estar actuando en la generación de procesos de remociones en masa. Aun así, en la zona oeste del área de estudio existe la falla Caracol-Lo pequén, que en un trabajo más detallado podría ser considerado (Quezada, 1996)

6.3.4 Elevación

Las zonas altas de la zona corresponden a 234 m s.n.m. y las alturas mínimas a nivel del mar. Las zonas más elevadas se concentran en la zona sur de la cuenca y las zonas más deprimidas en la zona norte de la cuenca, esta forma del relieve está formada por la presencia de redes de drenaje, tales como el estero Nonguén, que erosionan y transportan material.

En cuanto a el peso asignado a este factor es de los menores entre ellos, el cual es de 4%, esto quiere decir que la elevación no es un factor tan predominante en la generación de los procesos de remociones en masa y esto coincide con las remociones en masa registradas y el mapa de elevación reclasificado generado, en lo que se puede observar que las remociones están concentradas en zonas de baja susceptibilidad, es decir, que tienen una elevación menor a 150 m s.n.m. como se observa en la Figura 6.7. Esto también coincide con la correlación obtenida en la Figura 6.6, en la cual se puede apreciar que el 94% de los puntos se encuentran en zonas de baja susceptibilidad, el 6% restante en zonas de moderada susceptibilidad y en zonas de alta susceptibilidad no existen registros de remociones en masa.

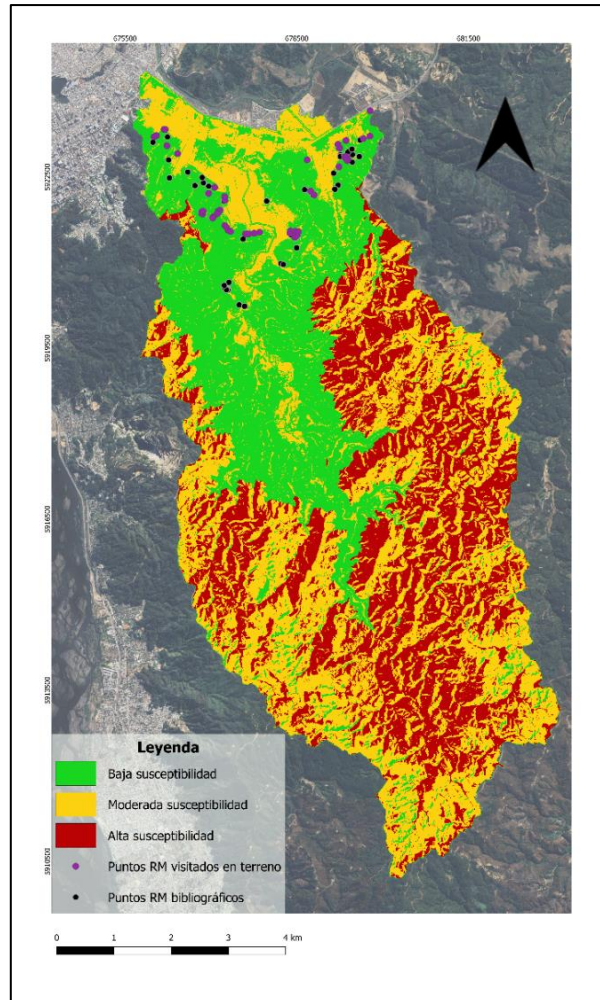


Figura 6.7: Mapa de elevación reclasificado con puntos de remociones en masa.

6.3.5 Pendiente

Este factor es el más importante debido a que las remociones en masa son movimientos gravitacionales y un incremento de la pendiente facilita el movimiento de material en las laderas.

Las pendientes mayores encontradas fueron de 55° , predominando las de 15° en gran parte de la zona, esto quiere decir que la topografía presente en el área de estudio es bastante escarpada. Para la zona de estudio se consideraron $> 20^\circ$, como zonas de alta susceptibilidad y se le asigna un peso del 49 %, esto comparado con las remociones en masa registradas, se interpreta que la correlación es bastante buena en cuanto a la generación de estos procesos (Fig. 6.6 y 6.8). Ya que tiene que un 12% de registros de remociones en masa asociados a zonas de baja susceptibilidad, un 25 % asociado a zonas de moderada susceptibilidad y un 64 % asociados a zonas de alta susceptibilidad.

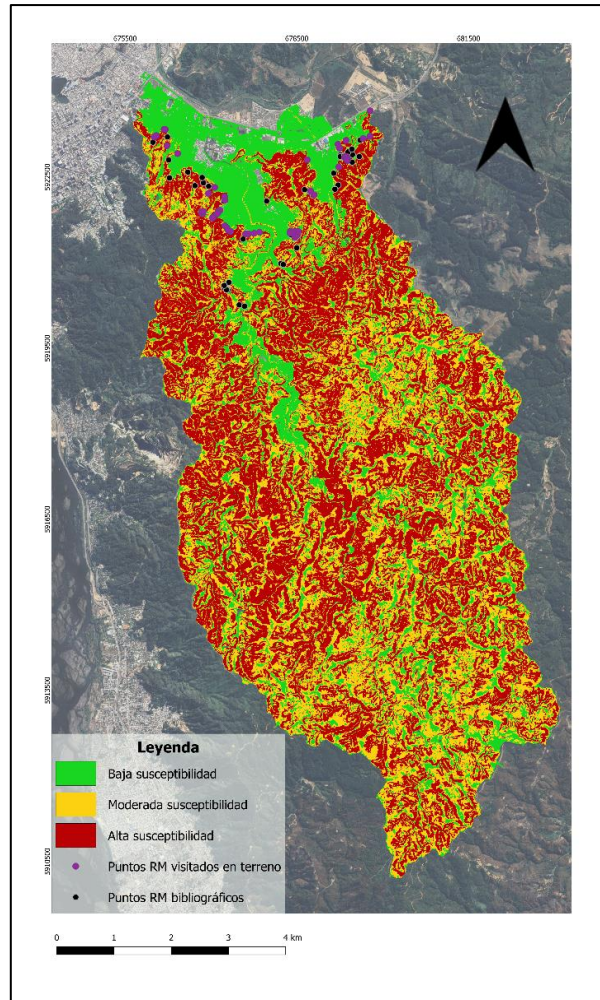


Figura 6.8: Mapa de pendientes reclasificado con puntos de remociones en masa

6.3.6 Orientación de ladera

De los resultados obtenidos se tiene que las laderas orientadas hacia el norte son las que pertenecen a zonas de alta susceptibilidad, las orientadas hacia el sur de moderada susceptibilidad y las orientadas de este a oeste de baja susceptibilidad, al asociar las remociones en masa a este factor se tiene que un 19% pertenece a zonas de baja susceptibilidad, un 39% a zonas de moderada susceptibilidad y un 42% a zonas de alta susceptibilidad, al tener estos porcentajes no se observa ninguna tendencia clara en cuanto a eventos ocurridos y la orientación de la ladera, además de que el peso asignado a este factor es bastante bajo (4%), para poder decir que es relevante en la ocurrencia de estos eventos, por lo que es bastante probable que este factor no influya en gran manera a la generación de remociones en masa (Fig. 6.6 y 6.9). También hay que destacar que la zona de estudio presenta bastantes precipitaciones y presencia de cobertura forestal, por lo que las

laderas que tienen mayor radiación debido a su orientación son casi despreciables por la cantidad de humedad constante presente en el área y su conservación debido a los bosques.

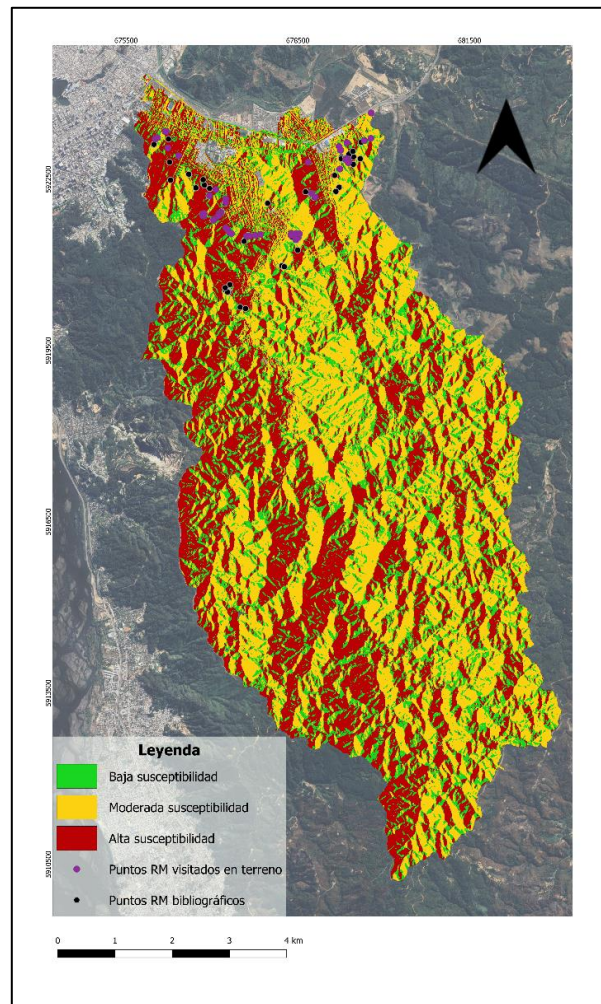


Figura 6.9. Mapa de orientación de laderas reclasificado con puntos de remociones en masa.

6.3.7 Forma de ladera

En este caso el resultado obtenido en cuanto a la relación entre las remociones en masa registradas y la forma de la ladera, no se ve una correlación muy predominante. Se puede observar que la gran mayoría se reparte entre las laderas cóncavas (43%, zonas de alta susceptibilidad) y convexas (51%, zonas de moderada susceptibilidad), pero para la forma de ladera plana (6%, zonas de baja susceptibilidad) es casi nula la relación (Fig. 6.10). Además, el peso asignado es de un 4%, esto quiere decir que este factor no es tan determinante en la generación de procesos de remociones en masa.

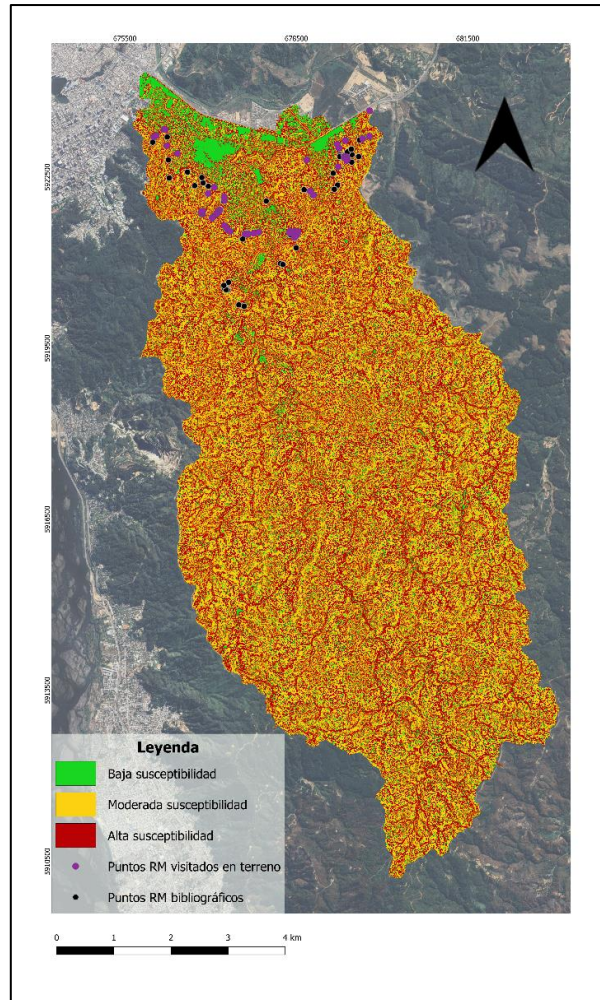


Figura 6.10: Mapa de forma de ladera reclasificado con puntos de remociones en masa.

6.3.8 Cercanía red de drenaje

La cercanía a las redes de drenaje es uno de los factores más importantes a considerar para la generación de remociones en masa en la zona de estudio, esto debido a la geomorfología presente del lugar y a la gran cantidad de afluentes existentes. Se consideró una distancia de 100 m. a las redes de drenaje, teniendo los primeros 50 metros como zonas de alta susceptibilidad, entre 50 y 100 m. de moderada susceptibilidad y mayor a 100 m. de distancia, ya es considerado de baja susceptibilidad. La correlación entre las remociones en masa registradas y este factor, no es la más acertada, ya que solamente un 6 % de las remociones en masa están ubicadas en zonas de alta susceptibilidad, mientras que un 9 % de ellas está en zonas de moderadas susceptibilidad y un 51 % en zonas de baja susceptibilidad. (Fig. 6.6 y Fig. 6.11). Por lo tanto, esto puede dar indicios de que se sobreestimó este factor y esto conlleva a no tener un modelo tan preciso, ya que se le asigna

un peso de 17 %, lo cual es bastante alto, para los resultados obtenidos. Lo importante a considerar con este factor, es que gracias a las redes de drenaje se generan estos paisajes escarpados y de alta pendiente, esto principalmente por la erosión que producen los afluentes de agua.

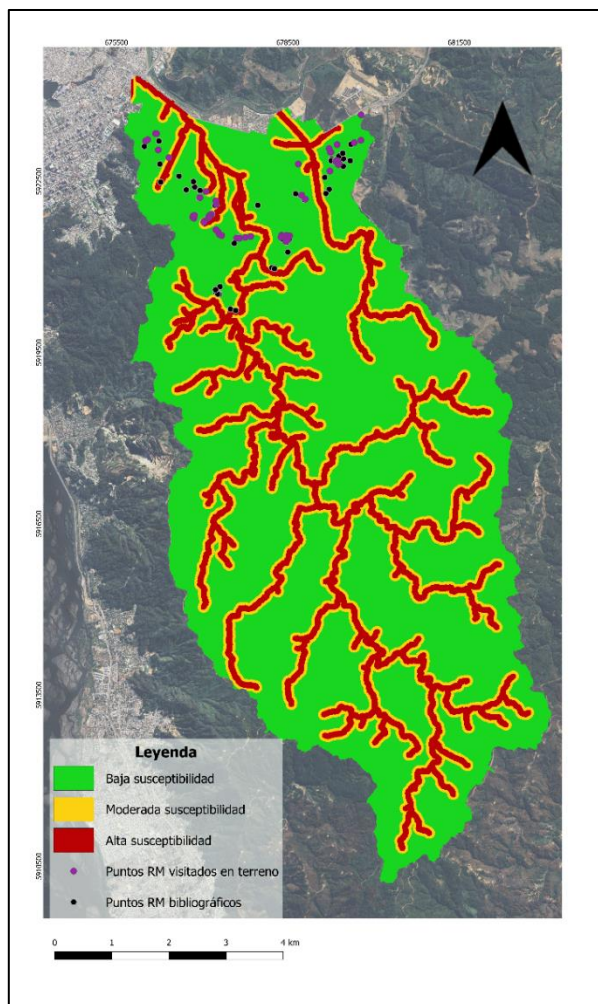


Figura 6.11: Mapa cercanía red de drenaje reclasificado con puntos de remociones en masa.

6.3.9 Uso de suelo

El uso de suelo es uno de los factores más determinantes en la generación de procesos de remociones en masa (Lara, 2008). Hay zonas en el área de estudio en donde existe un uso de suelo que tiene que ver con la intervención humana, principalmente la urbanización, estas zonas tienden a ser de las más afectadas por remociones en masa, debido a la realización de rellenos, taludes y construcciones, además de la inexistencia de vegetación que pueda dar sujeción al suelo. A este uso de suelo se le asigna una susceptibilidad alta, mientras que a las plantaciones y matorrales se les asigna un nivel de susceptibilidad moderado, así mismo para los bosques nativos y terrenos

agrícolas, se les asigna un nivel de susceptibilidad baja, debido a que hay poca intervención humana y existe vegetación capaz de mantener el suelo en condiciones óptimas (Lara, 2008). Esto se puede correlacionar fácilmente con el registro de remociones en masa, ya que un 66 % de estos eventos están ubicados en los bordes de la urbanización (zonas de alta susceptibilidad) con sus respectivos cerros colindantes (Fig. 6.6 y Fig.6.12), mientras que un 29% de los eventos de remociones en masa se encuentran en zonas de moderada susceptibilidad y solo un 7% en zonas de baja susceptibilidad por lo tanto, a este factor se le asigna un peso bastante importante en el trabajo, el cual corresponde a un 22 %.

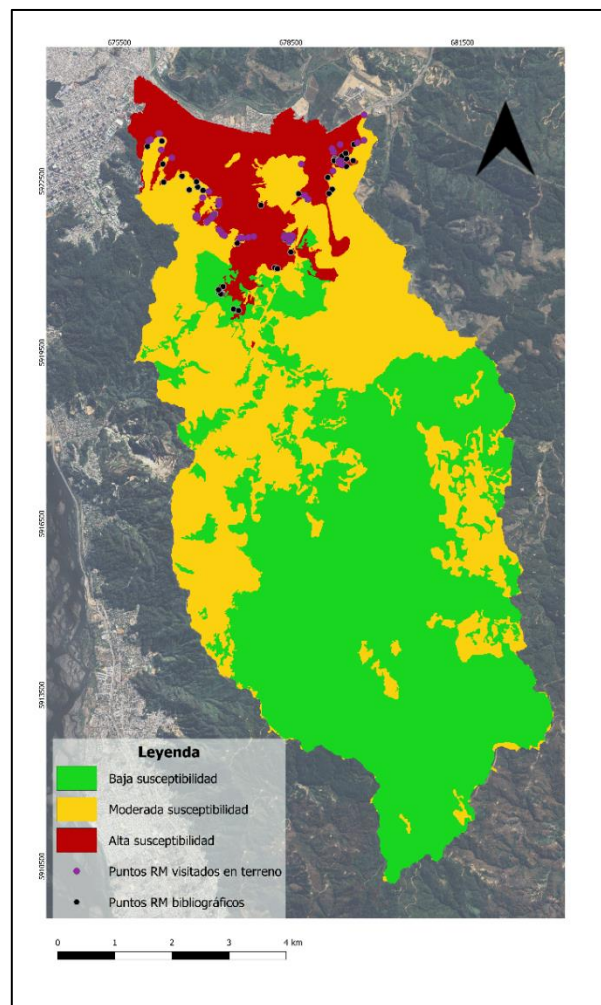


Figura 6.12: Mapa de uso de suelo reclasificado con puntos de remociones en masa.

6.4 Factores desencadenantes

6.4.1 Precipitaciones

Según los datos extraídos de la estación Estero Nonguén frente Universidad del Bío Bío para los datos de las precipitaciones del año presente en la zona de estudio alcanzan un total de 1113.1 mm. Así mismo según los datos extraídos de la estación Andalién para los datos de precipitaciones de los años 2005 y 2006, años en los cuales se registraron lluvias torrenciales y gran cantidad de remociones en masa en la zona de estudio y Concepción, según los informes de Naranjo (2005 y 2006), se tiene que para el año 2005 las precipitaciones anuales fueron de 1445.4 mm. Y para el año 2006 se tuvieron 1413.5 mm. (Fig.6.13)

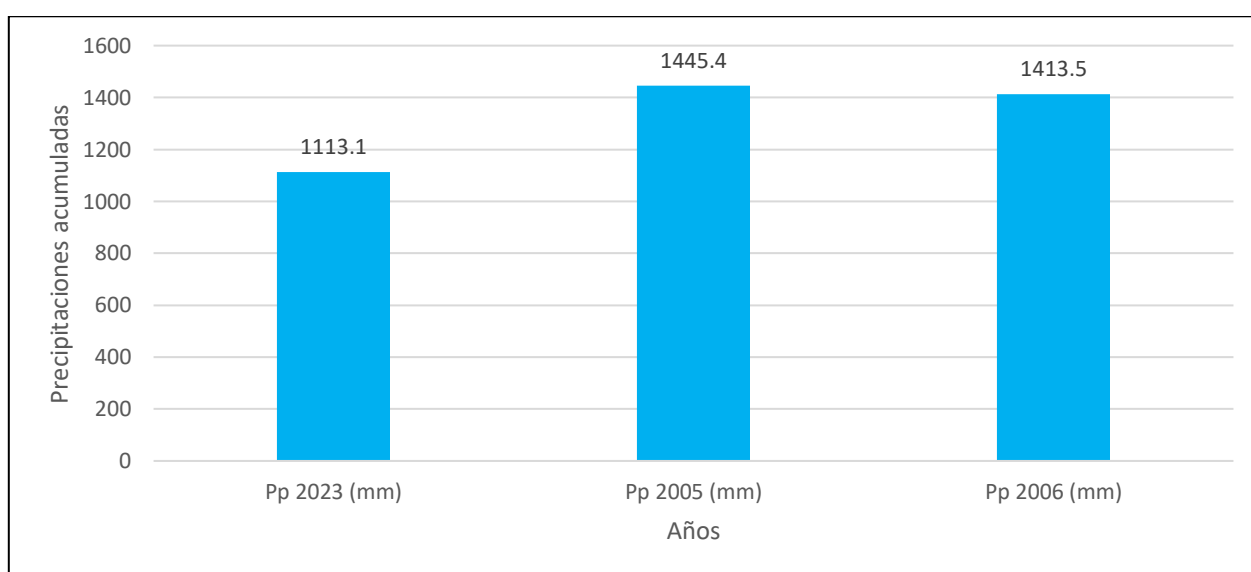


Figura 6.13: Precipitaciones anuales acumuladas (mm) de los años 2005, 2006 y 2023.

Con esto se puede evidenciar que existe una diferencia de aproximadamente 300 mm anuales entre el presente año (2023), en comparación con los años más críticos registrados en la comuna de Concepción y en la zona de estudio. Esta diferencia de cantidad de precipitaciones puede dar un indicio de que tan probable es que ocurra un proceso de remoción en masa con respecto a la cantidad de lluvia caída en un año. Aun así, se cree que es más determinante la cantidad de mm caídos en cierta cantidad de tiempo (Naranjo, 2005 y 2006), es decir, que tan concentradas e intensas son las precipitaciones. Para visualizar esto de mejor manera, se elabora un gráfico con los datos extraídos de DGA, de la cantidad de mm caídos en los años 2005, 2006 y 2023. (Fig.6.14).

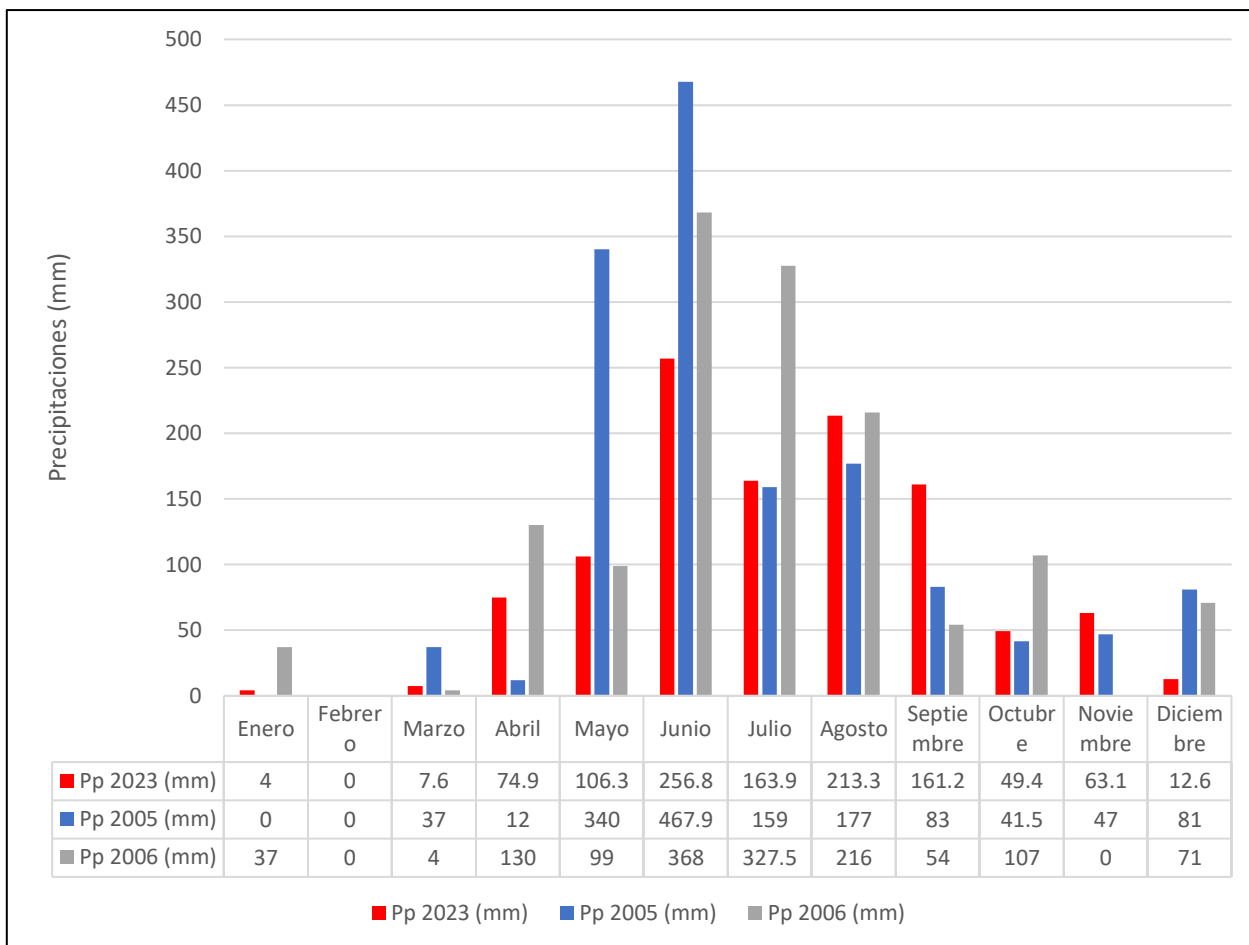


Figura 6.14: Precipitaciones mensuales (mm) de los años 2005, 2006 y 2023.

Se puede observar claramente que las concentraciones de lluvia en todos los años en cuestión son en los meses de junio, julio y agosto, exceptuando el año 2005 en donde las lluvias en mayo fueron mucho mayores que en los años 2006 y 2023. Así mismo se logra observar una gran cantidad de precipitaciones en junio del año 2005 (467.9 mm) y junio del año 2006 (368 mm), esto coincide con los informes de Naranjo (2005, 2006) sobre los daños y catastro de remociones en masa por precipitaciones de dichos años. Para el caso del año 2023, el mes con mayor cantidad de precipitaciones fue el mes de junio, al igual que en los otros casos, esto llevaría a pensar que durante ese mes ocurrieron remociones en masa en la zona de estudio, pero no de manera tan intensa como ocurrió en los años 2005 y 2006.

Aun así, este análisis no es del todo certero, ya que para poder realizar esto de mejor manera, sería necesario un monitoreo regular de la zona, para obtener mayores datos sobre la ocurrencia de nuevas remociones en masa y esto escapa de los alcances de este estudio, el cual se enfoca

principalmente en la susceptibilidad más que en el peligro. Cabe destacar que las precipitaciones es uno de los factores más determinantes para la generación de estos eventos. Por lo que se recomienda en un futuro incluir este factor desencadenante de manera más detallada y extensa.

6.4.2 Actividad antropogénica

La actividad del ser humano y la urbanización es uno de los factores a tomar en cuenta en la generación de remociones en masa. Esto se pudo observar en terreno en varias ocasiones, ya sea por el hecho de construir caminos y/o viviendas, lo que conlleva a la elaboración de taludes artificiales por los locatarios o la intervención de constructoras que no evalúan el peligro antes de levantar las viviendas. Esto puede generar en un futuro una amenaza, para los locatarios y vecinos del sector.

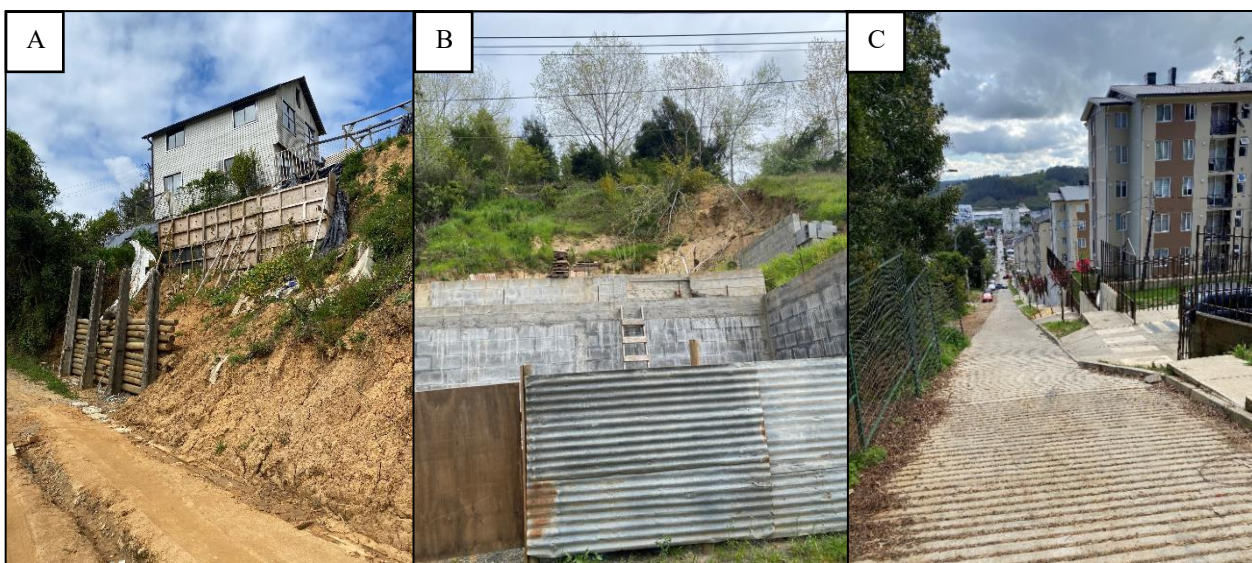


Figura 6.15: A) Remoción en masa generada por realización de camino y vivienda. B) Remoción en masa generada por la construcción de una vivienda. C) Viviendas construidas en una pendiente superior a 30°.

6.5 Análisis de susceptibilidad

El análisis de susceptibilidad fue orientado en la suma de pesos asignado a cada factor condicionante anteriormente mencionado y que se correlacionan entre sí para generar el mapa de susceptibilidad final. El cálculo de susceptibilidad fue basado en trabajos anteriores tales como: Mardones y Vidal (2001), Chen et al. (2011), Kayastha et al. (2013), Basharat et al. (2016), Saleem et al. (2020) y Borgomeo et al. (2014). Con los resultados obtenidos en cuanto a qué tan bien se comporta el modelo generado, se estima que existe un buen nivel de correlación entre los procesos de remoción en masa identificados y las zonas de susceptibilidad, teniendo un 63% de correlación entre zonas de alta susceptibilidad y eventos de remociones en masa, 21% en zonas de moderada

susceptibilidad y 12% en zonas de baja susceptibilidad, considerando la totalidad de remociones en masa (terreno y bibliografía). Aun así, teniendo esta correlación positiva, se estima que el modelo no es del todo preciso debido a la sobrestimación de algunos factores condicionantes y el posible error humano, debido a la utilización de un método heurístico.

6.6 Evaluación del peligro frente a remociones en masa

En la zona de estudio existen reportes de remociones en masa desde hace más de 15 años, según los informes de Hauser (2005), Naranjo y otros (2005 y 2006), en los cuales se reportan remociones en masa en sectores como Nonguén y Palomares, en donde su gran mayoría son originadas por las altas pendientes presentes y la intervención humana, además de la gran cantidad de precipitaciones como factor desencadenante principal.

Estos eventos reportados y complementado con los resultados de este trabajo, dan indicios de que en los sectores como lo son Los Lagos de Chile, Los Lirios, Nonguén, Palomares, Villas Huáscar, Puchacay entre otras, existen procesos de remociones en masa activos que podrían afectar a los habitantes de dichos sectores, quedando expuestos a este peligro.

Es fundamental la realización de evaluación de peligros geológicos y geotécnicos en la zona de estudio, para prevenir estos eventos de remociones en masa. Así mismo es fundamental generar catastros de manera periódica, finalmente generar planes de emergencia y/o preventivos en las comunidades locales que se ven expuestas a estos fenómenos, para así mitigar los efectos de remociones en masa mediante la generación de alertas tempranas.

7. CONCLUSIONES

De acuerdo con los objetivos presentados en la introducción, se pueden obtener del trabajo realizado las siguientes conclusiones:

- El tipo de remoción en masa más frecuente en el área de estudio corresponden a deslizamientos de tipo traslacional, los cuales pudieron ser mapeadas en terreno.
- Los principales factores condicionantes de remociones en masa en el área de estudio son, en orden decreciente de influencia: pendiente, uso del suelo, cercanía red de drenaje, orientación de laderas, elevación y forma de ladera.
- Los factores desencadenantes principales que actúan en el sector son las precipitaciones y la actividad antrópica. Esto se puede evidenciar en los registros históricos y en lo observado en terreno en la construcción de taludes que generan estos procesos de remoción en masa.
- La tendencia de registros de remociones en masa sigue la línea de la intersección entre las zonas de alta pendiente y zonas urbanizadas.
- El método para la confección del mapa de susceptibilidad a remociones en masa es en este caso es la utilización de una matriz de comparaciones pareadas para determinar el peso relativo de los factores condicionantes. Estos pesos son coherentes con el resultado del mapa de susceptibilidad final y su correlación con las remociones en masa mapeadas y recopiladas por bibliografía.
- La mayor parte del sector posee una susceptibilidad baja a generación de remociones en masa (36% del área total), seguida por la zona de alta susceptibilidad (33%) y finalmente la zona de intermedia susceptibilidad (31%). La zona de estudio tiene una repartición bastante equitativa de los tres rangos de susceptibilidad. La concentración de las remociones en masa mapeadas y recopiladas corresponden a la zona de alta susceptibilidad.
- El presente mapa de susceptibilidad a remociones en masa a escala local (1:10.000) entrega información importante en términos de planificación territorial para una comuna, por lo que se espera que el trabajo puede ser utilizado como base para trabajos futuros.

8. REFERENCIAS

- Aguirre, L., Hervé, F., & Godoy, E. (1972). Distribution of metamorphic facies in Chile: an outline. *Krystallinikum*, 9, 7-19.
- Basharat, M., Shah, H. R., & Hameed, N. (2016). Landslide susceptibility mapping using GIS and weighted overlay method: a case study from NW Himalayas, Pakistan. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(4), 1-19.
- Basso, M., Martínez X., Rodríguez R., Oróstegui P. y García A., (2015). Una mirada interdisciplinaria: proceso de remoción en masa en el cerro La Virgen, Concepción, Chile. XIV Congreso Geológico Chileno, La Serena, Chile
- Borgomeo, E., Hebditch, K. V., Whittaker, A. C., & Lonergan, L. (2014). Characterizing the spatial distribution, frequency and geomorphic controls on landslide occurrence, Molise, Italy. *Geomorphology*, 226, 148-161.
- Campos, F. (2014). Evaluación de la susceptibilidad de remociones en masa en la Quebrada de los Chanchos, Región Metropolitana, Chile. Tesis de pregrado. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Castro, F., Jaque, E. & Fernández, A. (2023). Rain-triggered landslides in urban contexts of Coastal South-Central Chile. 6th World Landslide Forum. Florence, Italy.
- Chen, H., Lin, G. W., Lu, M. H., Shih, T. Y., Horng, M. J., Ww, S. J., & Chuang, B. (2011). Effects of topography, lithology, rainfall and earthquake on landslide and sediment discharge in mountain catchments of southeastern Taiwan. *Geomorphology*, 133(3-4), 132-142.
- Chung C. F. & Fabbri, A. G.: 1999, Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* No.65-12, p., 1389–1399.
- CONAF. (2019). Plan de Manejo, Reserva Nacional Nonguén.
- Creixell, C. (2001). Petrología y Geotermobarometría de las Rocas Intrusivas de la Cordillera de la Costa entre los 36°30'y 38°00'S. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra.

- Cruden, D. M. & Varnes, D.J. (1996). Landslide types and processes. En A.K. Turner & R.Schuster (Eds.), Landslides, investigation and mitigation, Special report 247, pp. 36-75. Washington D.C.: Transportation Research Board. ISBN: 030906208X.
- Deckart, K., Hervé Allamand, F., Fanning, M., Ramírez, V., Calderón, M., & Godoy, E. (2014). U-Pb geochronology and Hf-O isotopes of zircons from the Pennsylvanian Coastal Batholith, south-central Chile.
- Digimapas Chile (2013). Imágenes y Cartografía Base para el área Metropolitana de Concepción, Región del Bío Bío. Informe Solicitado por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo del Gobierno de Chile. 91p. Informe Inédito
- EULA. (2002). Estudio básico zonificación del fundo Nonguén. Concepción.
- Gajardo, A. (1981). Geología de la Hoja Concepción-Chillán escala 1: 250.000, Región del Bío Bío. Mapas Geológicos Preliminares de Chile. N° 4. Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Galli, C. 1967. Geología Urbana y suelo de fundación de Concepción y Talcahuano, Chile. Universidad de Concepción. Informe final del Proyecto de Investigación N° 75 de la Comisión de Investigación Científica de la Universidad de Concepción (Inédito): 248 pp. Concepción.
- González de Vallejo, L., & Ferrer, M. (2011). Geological engineering. CRC Press
- Hauser, A. (2005). informe geológico geotécnico preliminar: sectores agüita de la perdiz y cerro la pólvora, concepción, viii región. SERNAGEOMIN. Santiago, Chile.
- Hauser, A. (2000). Remociones en masa en Chile (versión actualizada). SERNAGEOMIN. Boletín No. 59, 89 p, Santiago, Chile.
- Hervé, F. 1977. Petrology of the Crystalline Basement of the Nahuelbuta Mountains, South Central Chile. Comparative studies on the geology of the Circum-Pacific Orogenic Belt in Japan and Chile (Ishikawa, T., and Aguirre L. editors). Japan Society for the promotion of Science: 1-5. Tokyo.
- Hervé, F., Calderón, M., Fanning, C. M., Pankhurst, R. J., & Godoy, E. (2013). Provenance variations in the Late Paleozoic accretionary complex of central Chile as indicated by detrital zircons. *Gondwana Research*, 23(3), 1122-1135.

- Hervé, F., Faundez, V., Calderón, M., Massone, H. J., & Willner, A. P. (2007). Metamorphic and plutonic basement complexes. In *The Geology of Chile* (pp. 5-19).
- Hervé, F., Godoy, E., Parada, M. A., Ramos, V., Rapela, C., Mpodozis, C., & Davidson, J. (1987). A general view on the Chilean-Argentine Andes, with emphasis on their early history. *Circum-Pacific Orogenic Belts and Evolution of the Pacific Ocean Basin*, 18, 97- 113.
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167-194.
- Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales. (2012). Metodología para la Zonificación de Susceptibilidad General del Terreno a los Movimientos en Masa. N° 20 – 30. 27 pp. Bogotá.
- Kayastha, P., Dhital, M. R., & De Smedt, F. (2013). Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: A case study from the Tinau watershed, west Nepal. *Computers & Geosciences*, 52, 398-408
- Lambin E.F., Geist H., Rindfuss R.R. (2006) Introduction: Local Processes with Global Impacts. In: Lambin E.F., Geist H. (eds) *Land-Use and Land-Cover Change. Global Change - The IGBP Series*. Springer, Berlin, Heidelberg
- Lara, M., & Sepúlveda, S. (2008). Remociones en masa. Apuntes del curso. Universidad de Chile, curso de Geología Aplicada.
- Lavell, A. (2001). Sobre la gestión del riesgo: apuntes hacia una definición. *Biblioteca Virtual en Salud de Desastres-OPS*, 4, 1-22.
- Mardones, M., & Vidal, C. (2001). La zonificación y evaluación de los riesgos naturales de tipo geomorfológico: un instrumento para la planificación urbana en la ciudad de Concepción. *EURE (Santiago)*, 27(81), 97-122.
- Molina, C. (2016). Análisis de Susceptibilidad de Remociones en Masa en las Costas del Fiordo Comau, Región de Los Lagos, Chile. Memoria para optar al título de geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología: 132 pp. Santiago.

- Muñoz-Cristi, J. (1956). Handbook of South American Geology. Chile. Geological Society of America. Memoir. Vol. 65: 187-214.
- Naranjo, J. A.; Clavero, J.; Hauser, A.; Ramírez, P. 2005. Informe geológico sobre las remociones en masa causadas por las lluvias torrenciales de los días 26 y 27 de junio 2005 en Concepción, VIII Región. Informe Inédito, Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Naranjo, J., Arenas, M., & Ramírez, P. (2006). Remociones en masa causadas por las precipitaciones de los días 9 al 11 de julio de 2006, en algunos sectores de la Provincia de Concepción. Geólogos. Informe Inédito, Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Ramírez, P. (2004). Estudio geológico ambiental de la cuenca del estero Nonguén, Concepción. Memoria para optar al Título de Geóloga. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra. (Inédito).
- Saaty, T. L. (2004). Decision making—the analytic hierarchy and network processes (AHP/ANP). *Journal of systems science and systems engineering*, 13(1), 1-35.
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International journal of services sciences*, 1(1), 83-98
- Saleem, J., Ahmad, S. S., & Butt, A. (2020). Hazard risk assessment of landslide-prone sub-Himalayan region by employing geospatial modeling approach. *Natural Hazards: Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards*, 1-18.
- SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA (SERNAGEOMIN). 2012. Geología para la reconstrucción y la gestión del riesgo en la Región del Biobío. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-12-48, 12 p., 35 mapas a diferentes escalas. Santiago.
- UNISDR. (2009). Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastres. Oficina de las Naciones Unidas para Reducción de Riesgo de Desastres.
- Wesley, L. D. (2010). *Geotechnical Engineering in Residual Soils*. Ucrania: Wiley.
- Young, R. (2012). *Soil properties and behaviour (Vol. 5)*. Elsevier.

9. ANEXOS

Anexo A: Matrices de comparación entre pares.

Tabla 9.1: Matriz realizada por el Dr. Mauricio Espinoza.

	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	Ponderación resultante
[1] Pendiente	1	2	3	4	2	2	0.31
[2] Uso de suelo	1/2	1	2	3	1/2	2	0.18
[3] Orientación ladera	1/3	1/2	1	2	1/2	2	0.12
[4] Concavidad	1/4	1/3	1/2	1	1/3	1	0.07
[5] Cercanía red drenaje	1/2	2	2	3	1	2	0.22
[6] Elevación	1/2	1/2	1/2	1	0.5	1	0.09
CR	0.0297						

Tabla 9.2: Matriz realizada por Alberto Sanhueza.

	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	Ponderación resultante
[1] Pendiente	1	4	7	3	5	5	0.46
[2] Uso de suelo	1/4	1	3	1	2	4	0.17
[3] Orientación ladera	1/7	1/3	1	1/4	1/6	1	0.05
[4] Concavidad	1/3	1	4	1	1	3	0.14
[5] Cercanía red drenaje	1/5	1/2	6	1	1	5	0.14
[6] Elevación	1/5	1/4	1	1/3	1/5	1	0.05
CR	0.0492						

Tabla 9.3: Matriz de elaboración propia.

	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	Ponderación resultante
[1] Pendiente	1	6	7	6	5	7	0.50
[2] Uso de suelo	1/6	1	4	4	1	3	0.16
[3] Orientación ladera	1/7	1/4	1	1	1/5	2	0.05
[4] Concavidad	1/6	1/4	1	1	1/5	2	0.06
[5] Cercanía red drenaje	1/5	1	5	5	1	5	0.19
[6] Elevación	1/7	1/3	1/2	1/2	0.2	1	0.04
CR							0.0809

Anexo B: Inventario de remociones en masa.

Tabla 9.4: Ficha de inventario de procesos de remoción en masa utilizado en terreno.

Fecha		Coordenadas UTM	
Lugar		Comuna	Fecha ocurrencia
Uso de suelo		Litología	Tipo material removido
Tipo de remoción en masa			
Caída o desprendimientos <input type="checkbox"/>		Volcamientos	De bloques <input type="checkbox"/> Flexural <input type="checkbox"/>
Extensiones laterales <input type="checkbox"/>	Flujos <input type="checkbox"/>	Deslizamiento	Rotacional <input type="checkbox"/> Traslacional <input type="checkbox"/>
Vegetación			
Actividad Antrópica			
Grado de meteorización			
Fallas			
Forma de ladera			
Pendiente (Aprox.)			
Factor desencadenante			
Observaciones generales			
Fotografía o esquema			

Tabla 9.5: Recopilación de remociones en masa por Castro et al. (2023)

ID	Zona	Este	Norte	Tipo de remoción	Año
CCP00007	18 H	676260	5922800	Deslizamiento	1992
CCP00009	18 H	676596	5922590	Deslizamiento	1992
CCP00011	18 H	676721	5922350	Flujo	1992
CCP00028	18 H	676870	5922400	Flujo	1999
CCP00030	18 H	678729	5922250	Flujo	1999
CCP00032	18 H	678636	5922280	Flujo	2000
CCP00034	18 H	676961	5922340	Flujo	2000
CCP00035	18 H	676961	5922340	Flujo	2000
CCP00038	18 H	679265	5922890	Deslizamiento	2001
CCP00039	18 H	677235	5922100	Flujo	2001
CCP00040	18 H	677495	5920260	Flujo	2001
CCP00041	18 H	679265	5922890	Deslizamiento	2001
CCP00054	18 H	678500	5921260	Deslizamiento	2006
CCP00081	18 H	677562	5921413	Deslizamiento	2010
CCP00091	18 H	679367	5922845	Deslizamiento	2012
CCP00095	18 H	677973	5922080	Deslizamiento	2017
CCP00098	18 H	676847	5922493	Deslizamiento	2022
CCP00100	18 H	679381	5922857	Deslizamiento	2022
CCP00101	18 H	679382	5922843	Deslizamiento	2022
CCP00102	18 H	679379	5922848	Deslizamiento	2022
CCP00103	18 H	677636	5921519	Deslizamiento	2022
CCP00104	18 H	679390	5922852	Deslizamiento	2022
CCP00106	18 H	678520	5921550	Deslizamiento	2022
CCP00107	18 H	678222	5920987	Deslizamiento	2022
CCP00108	18 H	678406	5921487	Deslizamiento	2022
CCP00115	18 H	679373	5922849	Deslizamiento	2022
CCP00119	18 H	679357	5922873	Deslizamiento	2022
CCP00120	18 H	679260	5922862	Deslizamiento	2022

CCP00121	18 H	679331	5922840	Deslizamiento	2022
CCP00122	18 H	679332	5922867	Deslizamiento	2022
CCP00123	18 H	679473	5922895	Deslizamiento	2022
CCP00134	18 H	679590	5922860	Deslizamiento	2022
CCP00157	18 H	677228	5922077	Deslizamiento	2022
CCP00163	18 H	677314	5920656	Deslizamiento	2022
CCP00164	18 H	677300	5920532	Deslizamiento	2022
CCP00165	18 H	677295	5920522	Deslizamiento	2022
CCP00166	18 H	677266	5920537	Deslizamiento	2022
CCP00167	18 H	677237	5920561	Deslizamiento	2022
CCP00168	18 H	678265	5920967	Deslizamiento	2022
CCP00169	18 H	678472	5921430	Deslizamiento	2022
CCP00170	18 H	678517	5921476	Deslizamiento	2022
CCP00171	18 H	678395	5921522	Deslizamiento	2022
CCP00172	18 H	678399	5921552	Deslizamiento	2022
CCP00173	18 H	678391	5921534	Deslizamiento	2022
CCP00174	18 H	676276	5922486	Deslizamiento	2022
CCP00176	18 H	679223	5922361	Deslizamiento	2022
CCP00177	18 H	679145	5922567	Deslizamiento	2022
CCP00178	18 H	677587	5920237	Deslizamiento	2022
CCP00203	18 H	677168	5921920	Deslizamiento	S/R
CCP00204	18 H	677169	5921931	Deslizamiento	S/R
CCP00205	18 H	677019	5921784	Deslizamiento	S/R
CCP00206	18 H	676861	5921855	Deslizamiento	S/R
CCP00207	18 H	676832	5921890	Deslizamiento	S/R
CCP00208	18 H	676948	5922208	Deslizamiento	S/R
CCP00214	18 H	679470	5922762	Deslizamiento	S/R
CCP00219	18 H	678791	5922178	Deslizamiento	S/R
CCP00220	18 H	679166	5922287	Deslizamiento	S/R
CCP00221	18 H	677272	5920527	Deslizamiento	S/R

CCP00222	18 H	677233	5920601	Deslizamiento	S/R
CCP00010	18 H	679394	5922940	Deslizamiento	1992
CCP00050	18 H	679606	5923147	Deslizamiento	2006
CCP00124	18 H	679461	5922990	Deslizamiento	2022
CCP00152	18 H	675987	5923112	Deslizamiento	2022
CCP00175	18 H	676241	5923204	Deslizamiento	2022

Tabla 9.6: Remociones en masa visitadas en terreno.

ID	Zona	Este	Norte	Tipo de remoción	Año
RM1	18 H	676008	5923207	Deslizamiento	2023
RM2	18 H	676047	5923229	Deslizamiento	2023
RM3	18 H	676183	5923337	Deslizamiento	2023
RM4	18 H	676202	5923335	Deslizamiento	2023
RM5	18 H	676231	5923051	Deslizamiento	2023
RM6	18 H	676419	5922912	Deslizamiento	2023
RM7	18 H	676959	5922214	Deslizamiento	2023
RM8	18 H	677066	5922320	Deslizamiento	2023
RM9	18 H	677246	5922096	Deslizamiento	2023
RM10	18 H	677239	5922159	Deslizamiento	2023
RM11	18 H	677160	5921921	Deslizamiento	2023
RM12	18 H	677130	5921905	Deslizamiento	2023
RM13	18 H	677124	5921897	Deslizamiento	2023
RM14	18 H	677120	5921868	Deslizamiento	2023
RM15	18 H	677106	5921857	Deslizamiento	2023
RM16	18 H	677045	5921805	Deslizamiento	2023
RM17	18 H	677032	5921794	Deslizamiento	2023
RM18	18 H	677030	5921784	Deslizamiento	2023
RM19	18 H	676858	5921854	Deslizamiento	2023
RM20	18 H	676837	5921862	Deslizamiento	2023
RM21	18 H	676841	5921892	Deslizamiento	2023
RM22	18 H	676864	5921903	Deslizamiento	2023
RM23	18 H	677242	5921652	Deslizamiento	2023
RM24	18 H	677277	5921615	Deslizamiento	2023
RM25	18 H	677301	5921568	Deslizamiento	2023
RM26	18 H	677343	5921550	Deslizamiento	2023
RM27	18 H	677604	5921508	Deslizamiento	2023
RM28	18 H	677656	5921504	Deslizamiento	2023
RM29	18 H	677757	5921516	Deslizamiento	2023
RM30	18 H	677851	5921534	Deslizamiento	2023
RM31	18 H	678389	5921556	Deslizamiento	2023
RM32	18 H	678389	5921540	Deslizamiento	2023

RM33	18 H	678379	5921519	Deslizamiento	2023
RM34	18 H	678464	5921445	Deslizamiento	2023
RM35	18 H	678494	5921471	Deslizamiento	2023
RM36	18 H	678474	5921553	Deslizamiento	2023
RM37	18 H	678529	5921546	Deslizamiento	2023
RM38	18 H	678681	5922801	Deslizamiento	2023
RM39	18 H	678805	5922188	Deslizamiento	2023
RM40	18 H	678743	5922256	Deslizamiento	2023
RM41	18 H	679236	5922680	Deslizamiento	2023
RM42	18 H	679337	5922848	Deslizamiento	2023
RM43	18 H	679363	5922864	Deslizamiento	2023
RM44	18 H	679366	5922863	Deslizamiento	2023
RM45	18 H	679370	5922860	Deslizamiento	2023
RM46	18 H	679396	5922806	Deslizamiento	2023
RM47	18 H	679381	5922792	Deslizamiento	2023
RM48	18 H	679252	5923009	Deslizamiento	2023
RM49	18 H	679242	5923012	Deslizamiento	2023
RM50	18 H	679660	5923176	Deslizamiento	2023
RM51	18 H	679777	5923217	Deslizamiento	2023
RM52	18 H	679786	5923683	Deslizamiento	2023
RM53	18 H	679361	5923143	Deslizamiento	2023
RM54	18 H	679221	5923074	Deslizamiento	2023

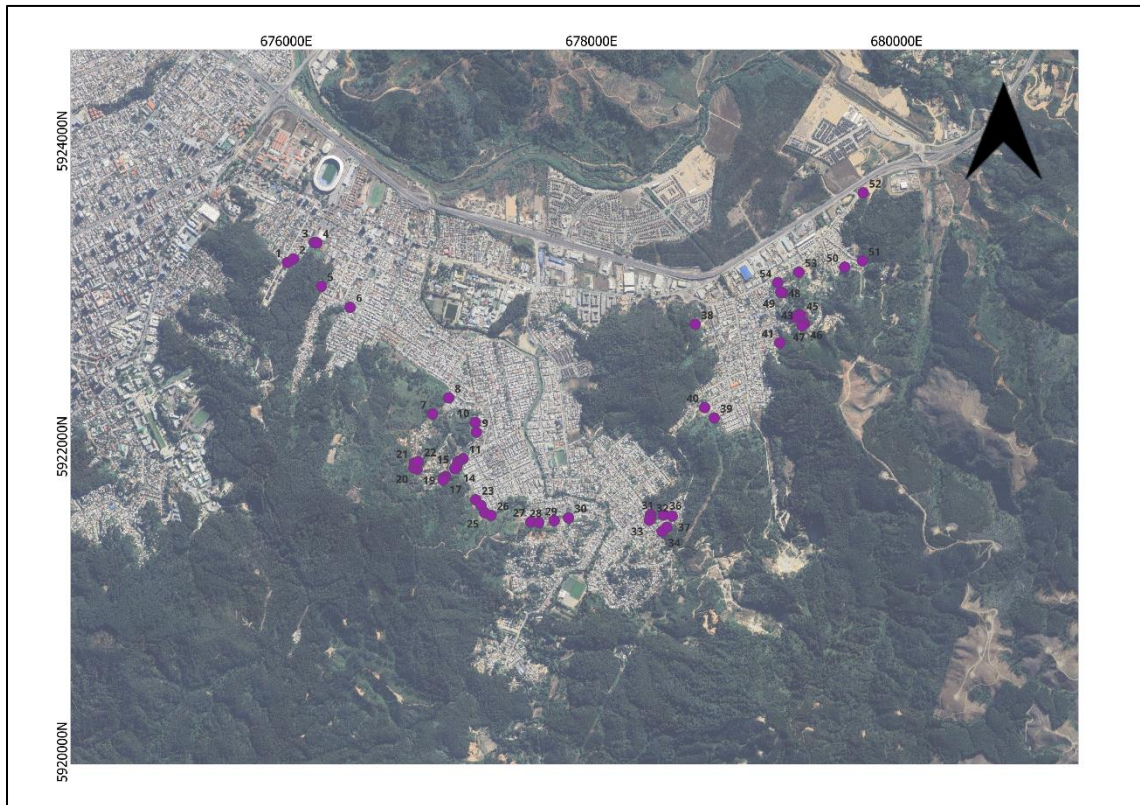
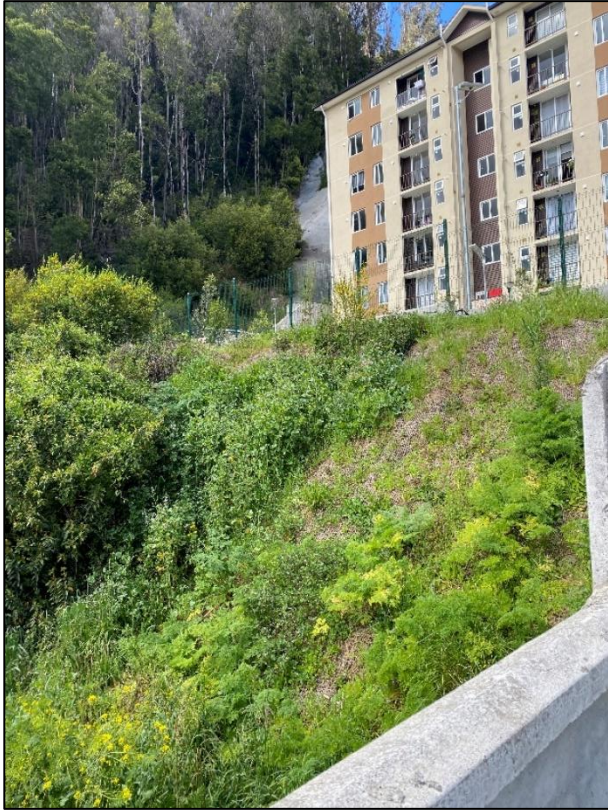


Figura 9.1: Mapa inventario de remociones en masa vistas en terreno



Fotografia 1: RM 1



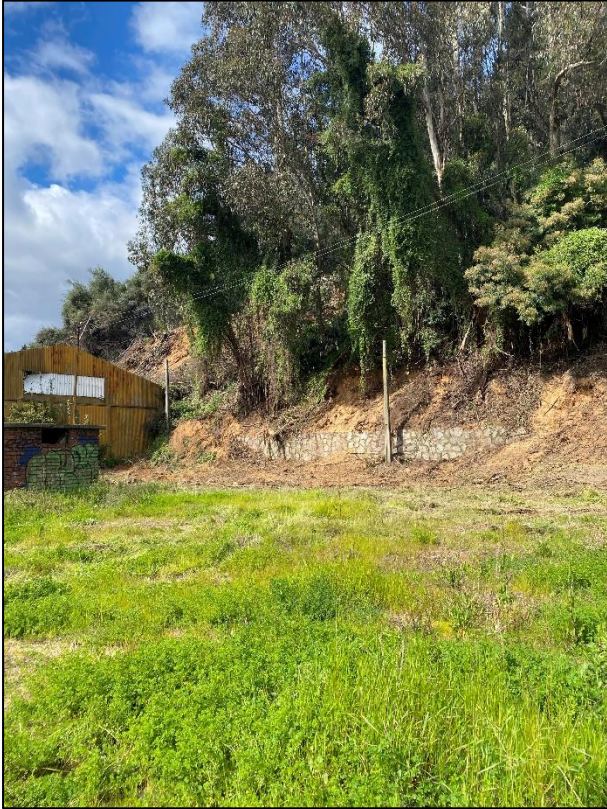
Fotografia 2: RM 1



Fotografia 3: RM 2



Fotografia 4: RM 3



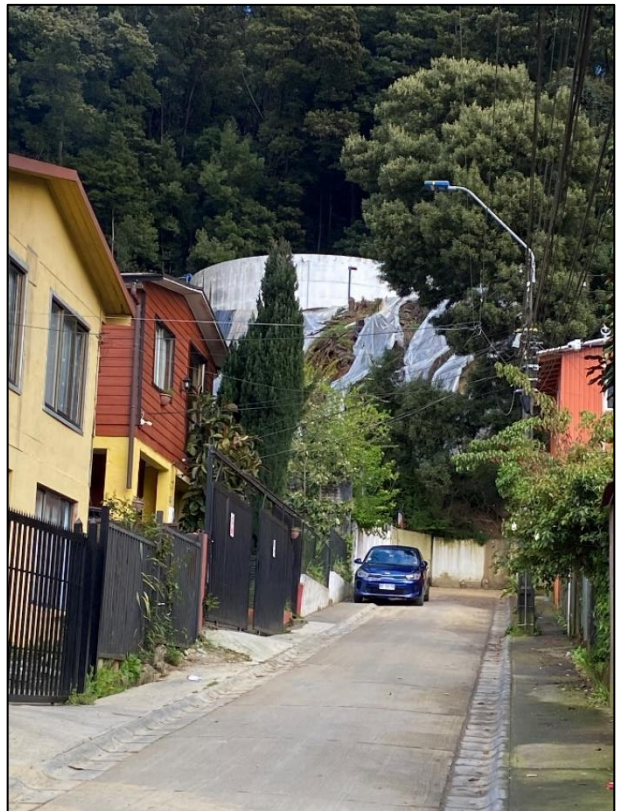
Fotografia 5: RM 4



Fotografia 6: RM 5



Fotografia 7: RM 5



Fotografia 8: RM 5



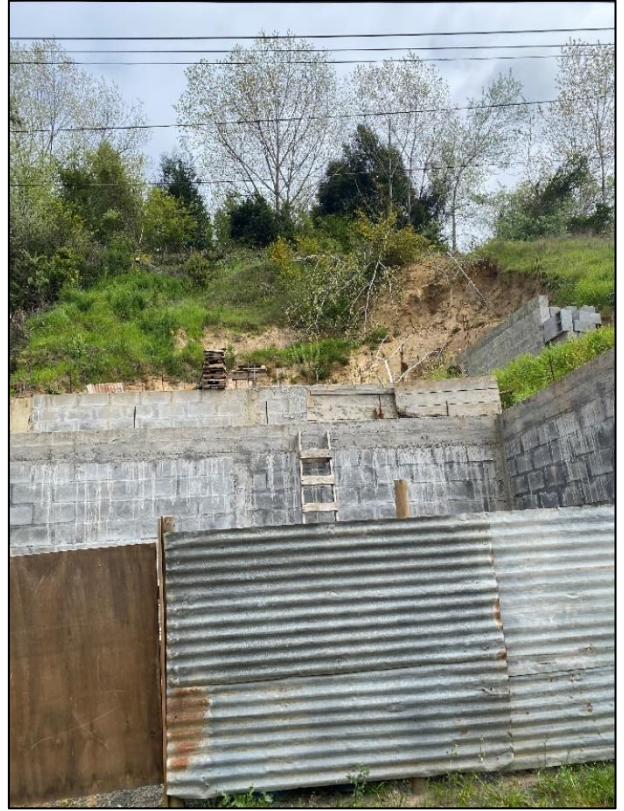
Fotografía 9: RM 6.



Fotografía 10: RM 7.



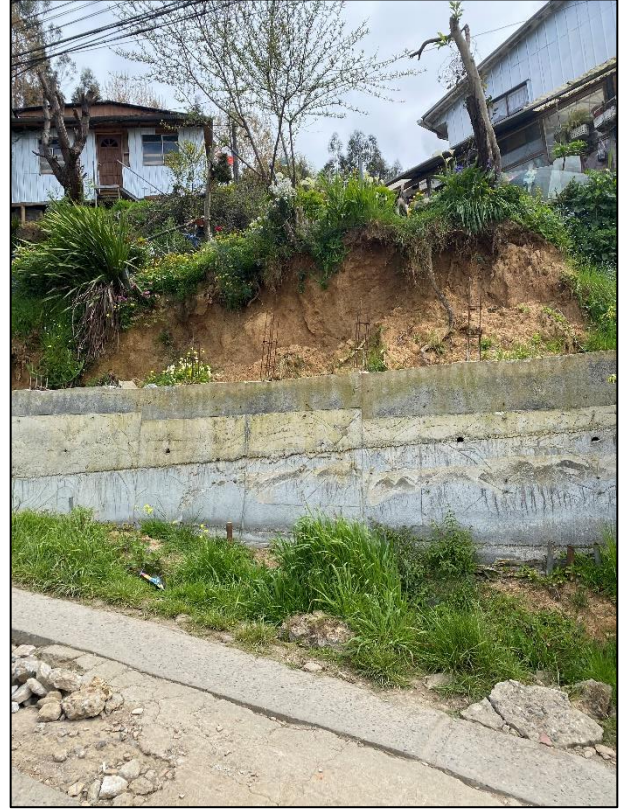
Fotografía 11: RM 8.



Fotografía 12: RM 9.



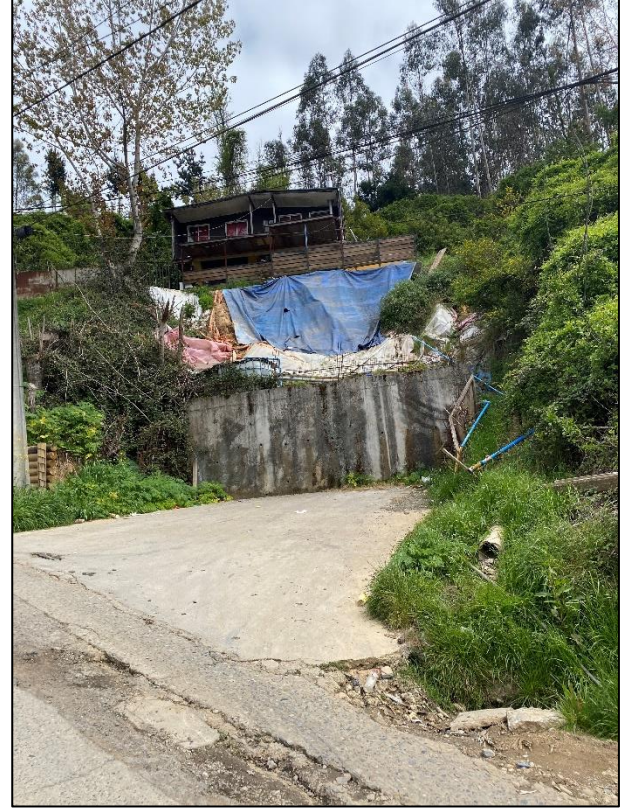
Fotografia 13: RM 10.



Fotografia 14: RM 11.



Fotografia 15: RM 12.



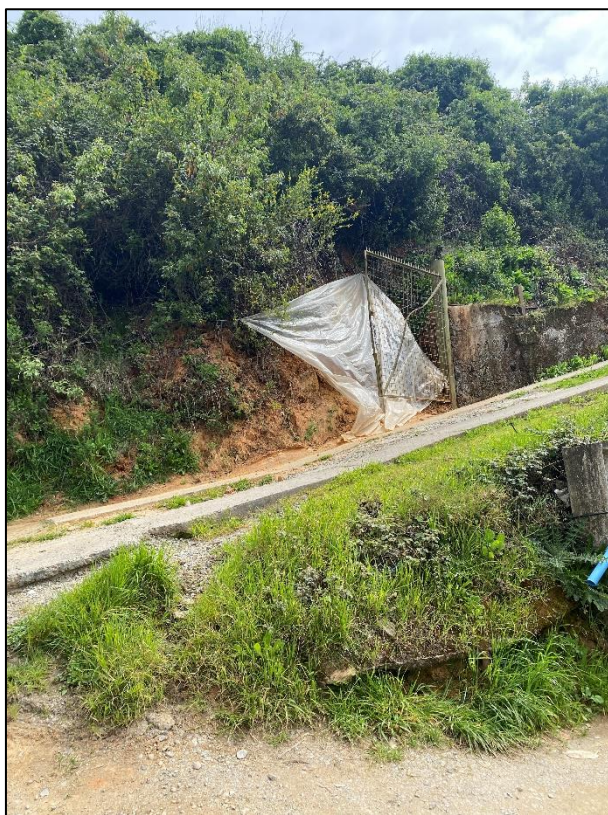
Fotografia 16: RM 13.



Fotografia 17: RM 14.



Fotografia 18: RM 15.



Fotografia 19: RM 16



Fotografia 20: RM 17



Fotografia 21: RM 18.



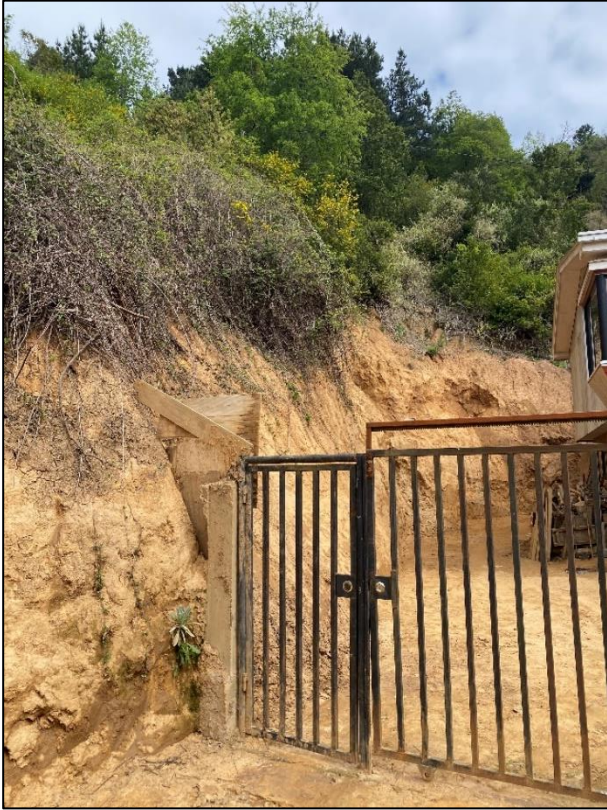
Fotografia 22:RM 18.



Fotografia 23: RM 19.



Fotografia 24: RM 19.



Fotografía 25: RM 20.



Fotografía 26: RM 21.



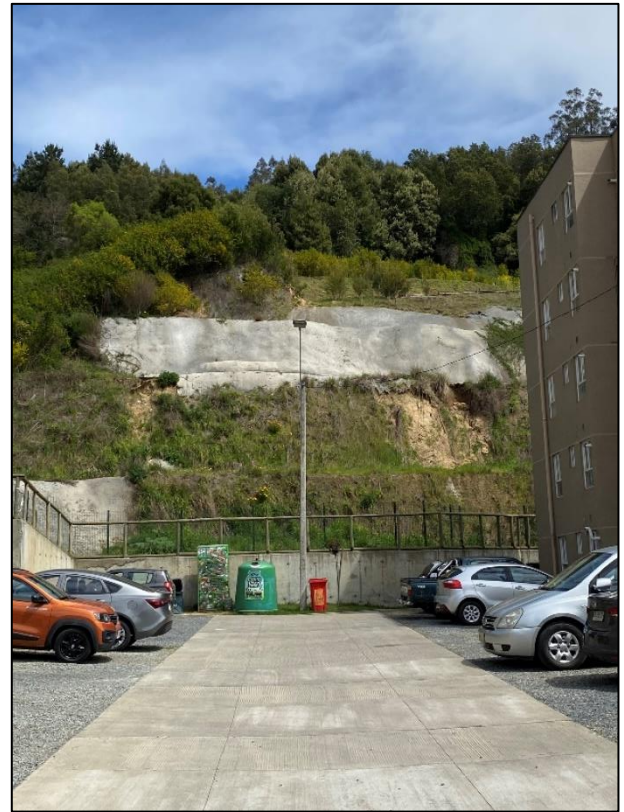
Fotografía 27: RM 22



Fotografía 28: RM 22



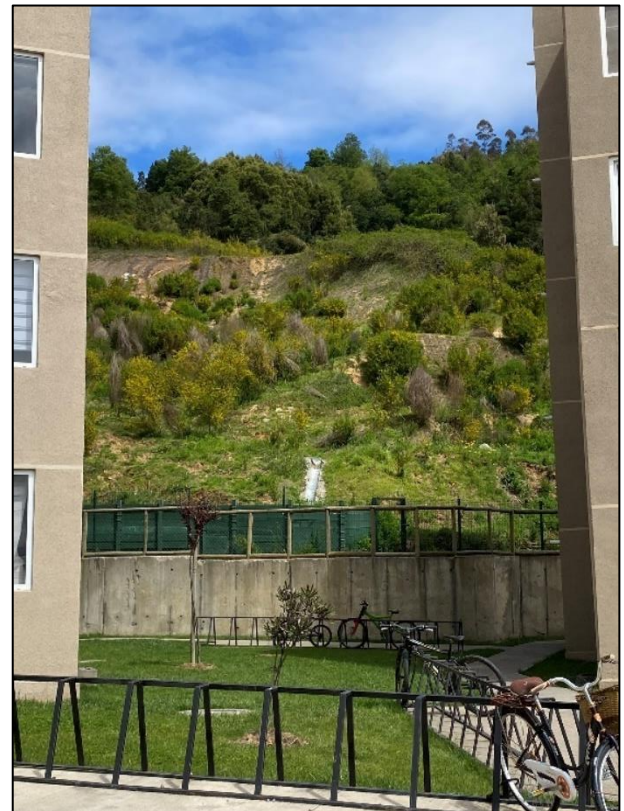
Fotografia 29: RM 23.



Fotografia 30: RM 24.



Fotografia 31: RM 25.



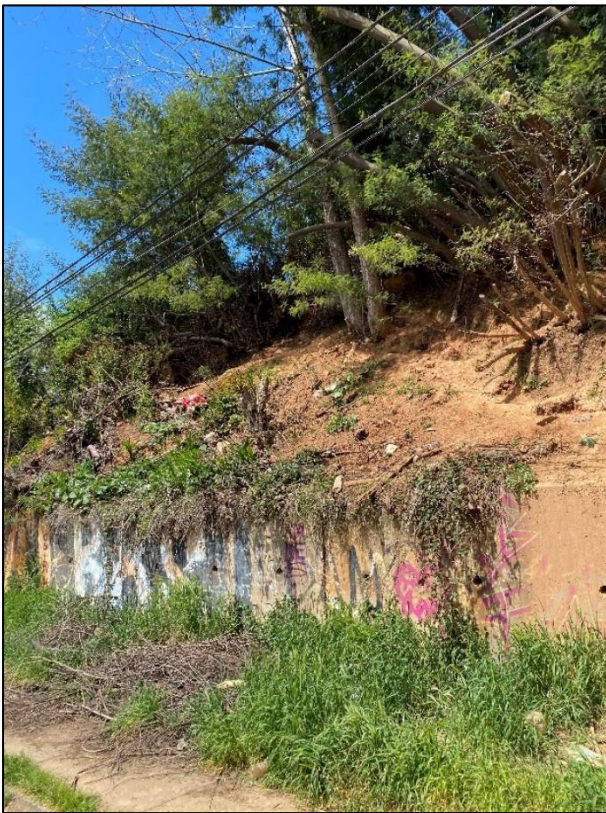
Fotografia 32: RM 26.



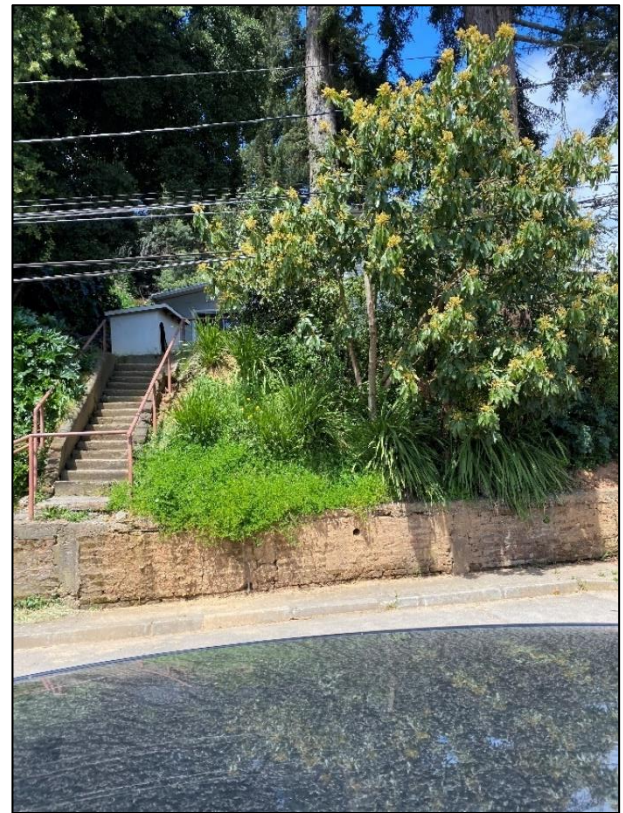
Fotografia 33. RM 27.



Fotografia 34: RM 28.



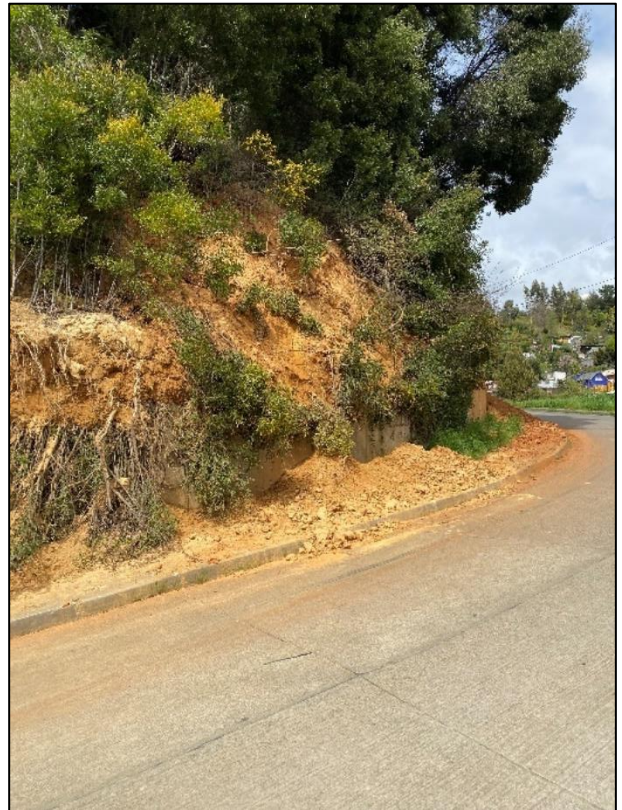
Fotografia 35: RM 29.



Fotografia 36: RM 30.



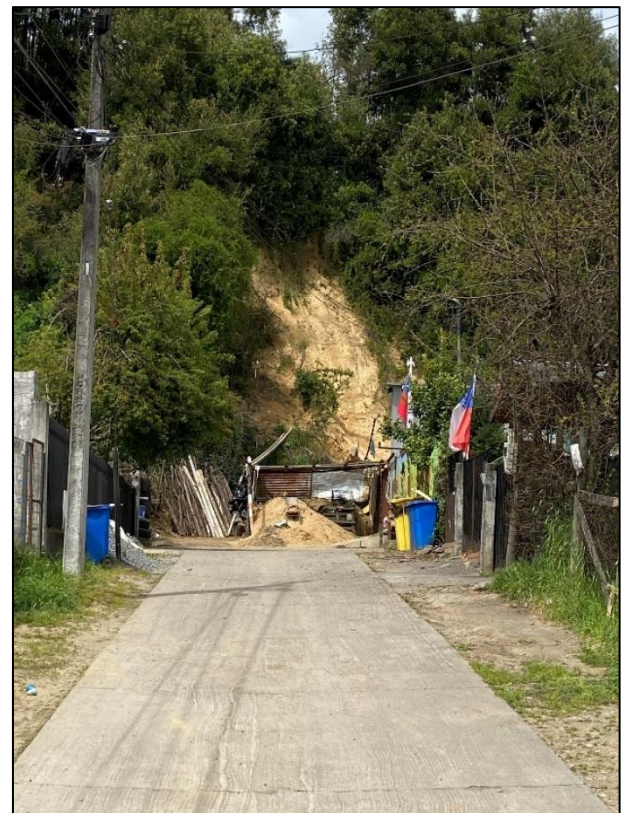
Fotografía 37: RM 31.



Fotografía 38: RM 32.



Fotografía 39: RM 33.



Fotografía 40: RM 34.



Fotografia 41: RM 35.



Fotografia 42: RM 36.



Fotografia 43: RM 36



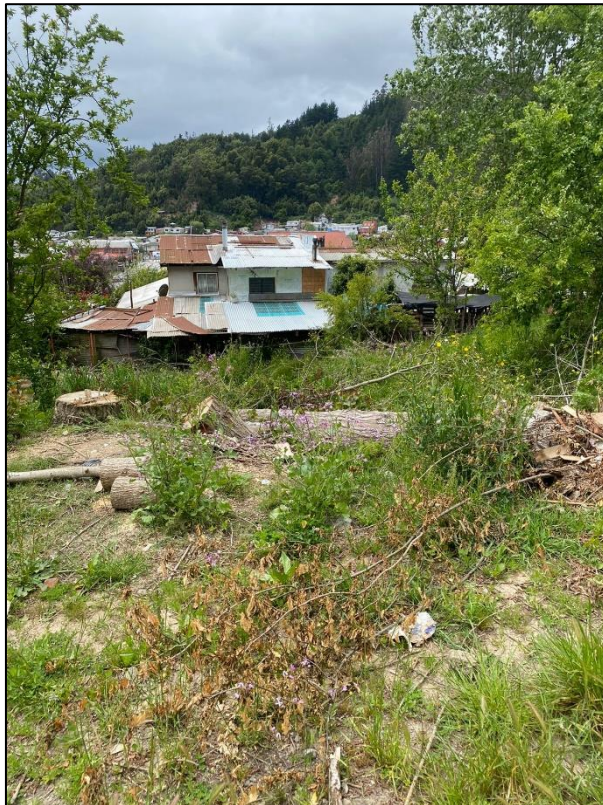
Fotografia 44: RM 37.



Fotografia 45: RM 38.



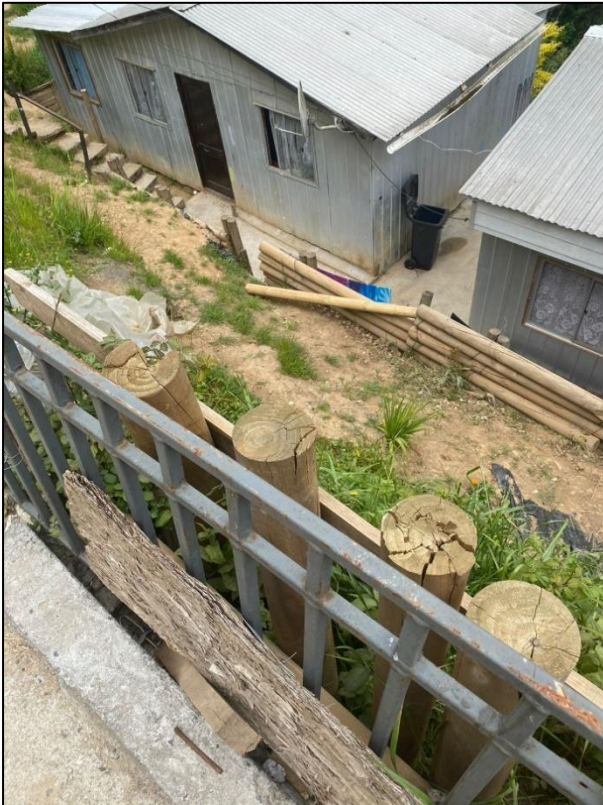
Fotografia 46: RM 39.



Fotografia 47: RM 40.



Fotografia 48: RM 41.



Fotografia 49: RM 42.



Fotografia 50: RM 43.



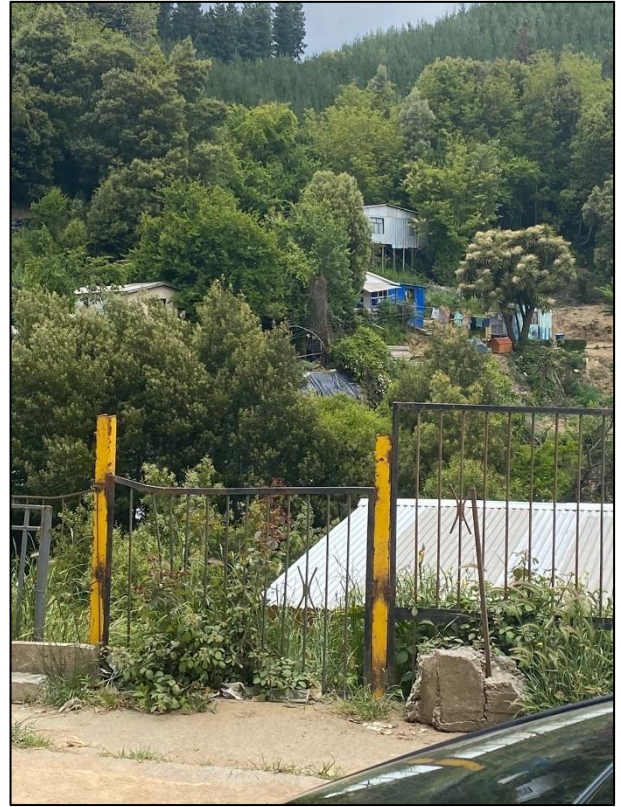
Fotografia 51: RM 44.



Fotografia 52: RM 45.



Fotografia 53: RM 46.



Fotografia 54: RM 47



Fotografia 55: RM 48.



Fotografia 56: RM 49



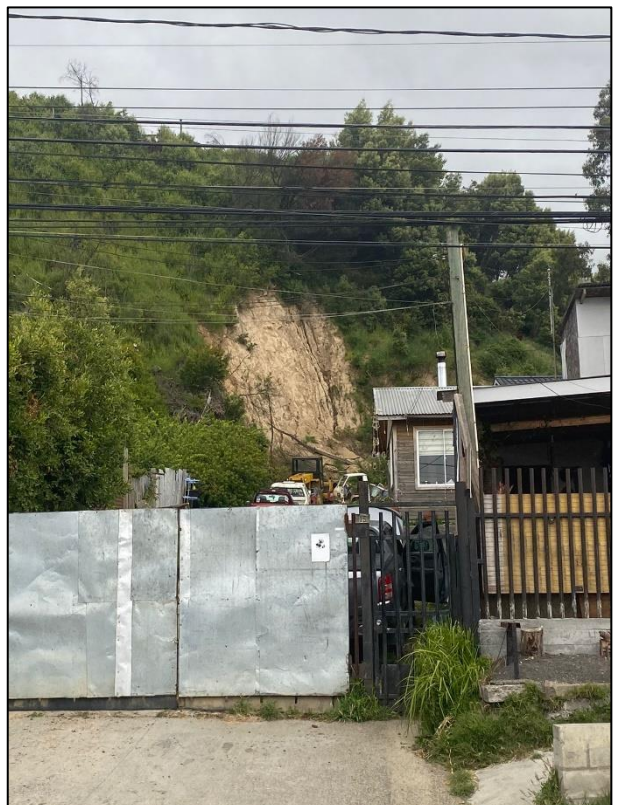
Fotografia 57: RM 50.



Fotografia 58: RM 51.

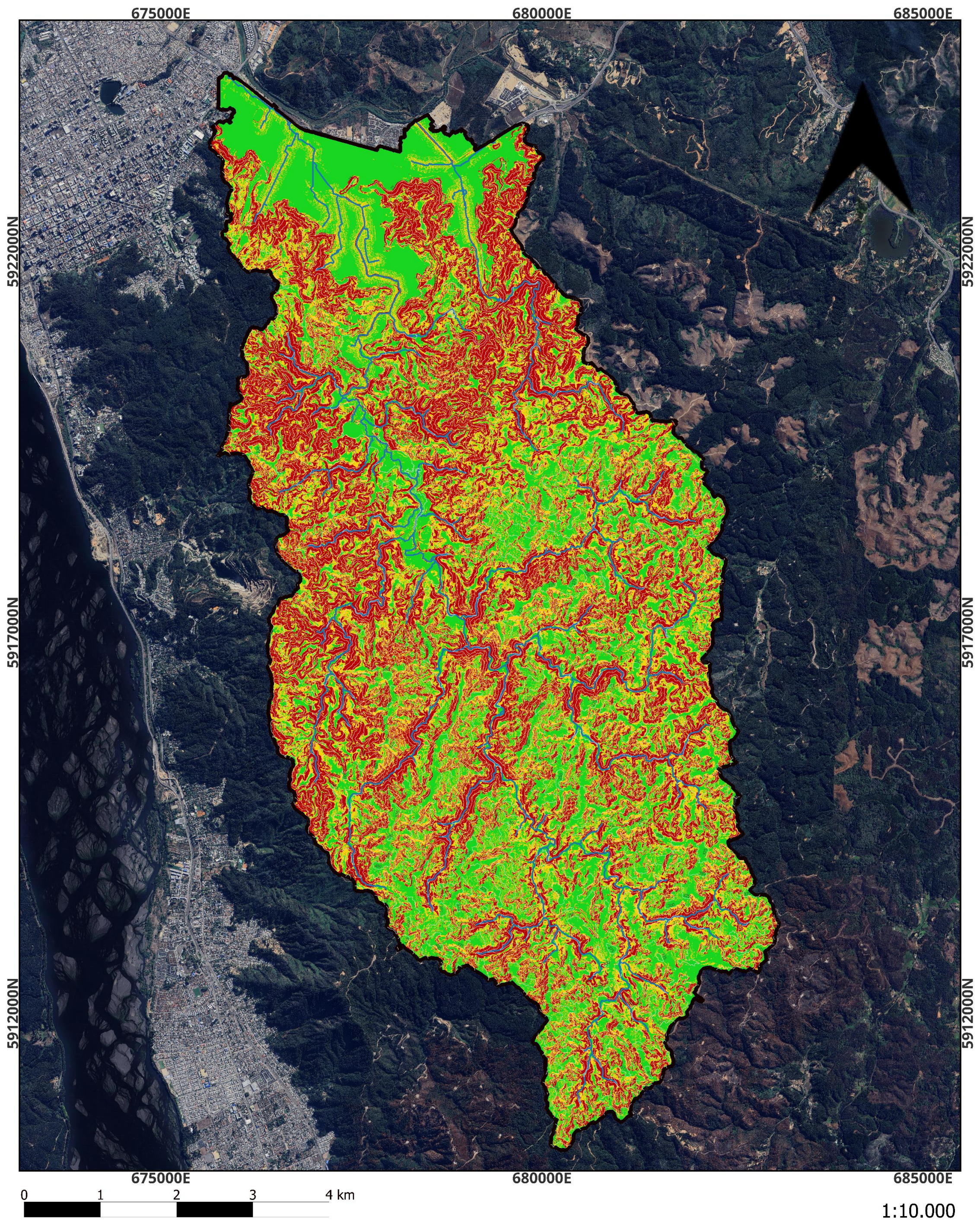


Fotografia 59: RM 52.



Fotografia 60: RM 53.

Mapa de susceptibilidad frente a remociones en masa en la cuenca de Nonguén, Región del BioBío, Chile.






Leyenda

Niveles de susceptibilidad

-  Baja susceptibilidad
-  Moderada susceptibilidad
-  Alta susceptibilidad

Simbología

-  Curvas de nivel
-  Límite de cuenca
-  Redes de drenaje

Metodología

La metodología utilizada pertenece a un método heurístico, para el cual se realiza un mapa de susceptibilidad en base a la superposición ponderada de mapas temáticos cualitativos, para cada factor condicionante seleccionado mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) (Saaty, 2004; Saaty, 2008). Los factores condicionantes utilizados corresponden a : pendiente, uso de suelo, orientación de ladera, forma de ladera, cercanía a redes de drenaje y elevación.

Referencias

- SAATY, T. L. (2004). Decision making—the analytic hierarchy and network processes (AHP/ANP). Journal of systems science and systems engineering, 13(1), 1-35.
- SAATY, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. International journal of services sciences, 1(1), 83-98