



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



**SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN MASA EN
LAS COMUNAS DE CONCEPCIÓN, CHIGUAYANTE Y
HUALQUI. REGIÓN DEL BIOBÍO, CHILE.**

Memoria para optar al Título de Geólogo

Felipe Armando Baltierra Suazo

Profesor Patrocinante: Dr. Joaquín Alejandro Cortés Aranda
Profesional Guía: Dr. (c) Francisco Eduardo Castro Venegas
Profesores Comisión: Dra. Edilia del Carmen Jaque Castillo
Dra. Ianire Galilea Salvador

Concepción, 2023

Para Armando y Yanet

ÍNDICE

Página

RESUMEN	
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos	3
1.1.1. Objetivo General	3
1.1.2. Objetivos Específicos	3
1.2. Ubicación y accesos	3
1.3. Trabajos anteriores	5
1.4. Agradecimientos	6
2. ANTECEDENTES	7
2.1. Marco teórico para los procesos de RM	7
2.1.1. Conceptos generales de las RM	7
2.1.1.1. Factores condicionantes.....	7
2.1.1.2. Factores desencadenantes.....	7
2.1.1.3. Susceptibilidad.....	7
2.1.1.4. Peligro.....	8
2.1.1.5. Riesgo.....	8
2.1.1.6. Vulnerabilidad.....	8
2.1.1.7. Zonificación.....	8
2.1.2. Remociones en masa	9
2.1.2.1. Generalidades.....	9
2.1.2.2. Tipos de RM.....	11
A. Caída (<i>fall</i>)	12
B. Vuelco (<i>topple</i>)	13
C. Deslizamiento (<i>slide</i>)	14

a. Deslizamiento rotacional.....	14
b. Deslizamiento traslacional.....	15
D. Extensión lateral (<i>lateral spread</i>)	15
E. Flujo (<i>flow</i>)	16
2.1.2.3. Factores condicionantes.....	17
A. Pendiente.....	17
B. Litología.....	17
C. Debilidades estructurales.....	18
D. Hidrogeología.....	18
E. Vegetación.....	19
F. Geomorfología.....	19
2.1.2.4. Factores desencadenantes.....	20
A. Precipitaciones.....	20
B. Sismicidad.....	21
C. Acción antrópica.....	21
D. Volcanismo.....	22
2.2. Síntesis geológica y geomorfológica para el AMC.....	23
2.2.1. Litología.....	23
2.2.1.1. Rocas metamórficas.....	23
A. Serie Oriental.....	23
2.2.1.2. Rocas ígneas.....	24
A. Batolito Costero del Sur.....	24
2.2.1.3. Rocas sedimentarias.....	24
A. Formación Santa Juana.....	24
B. Formación Quiriquina	25
C. Formación Curanilahue.....	26
D. Formación Andalién.....	26
E. Formación Huachipato.....	27
2.2.2. Geología estructural.....	27
2.2.3. Geomorfología y clima.....	28
2.2.3.1. Geomorfología regional.....	28

A. Planicies litorales.....	29
B. Cordillera de la Costa.....	30
C. Depresión intermedia.....	30
D. Precordillera.....	30
E. Cordillera de los Andes.....	31
2.2.3.2. Geomorfología local.....	31
2.2.3.3. Drenaje.....	33
A. Río Andalién.....	33
B. Río Biobío.....	33
2.2.3.4. Clima.....	34
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	38
3.1. Compilación de información para base de datos.....	38
3.1.1. Inventario de puntos de RM.....	38
3.1.2. Material topográfico digital.....	39
3.2. Método estadístico “Frequency Ratio”	40
3.3. Parámetros considerados.....	44
3.3.1. Grado de pendiente.....	45
3.3.2. Orientación de la pendiente.....	46
3.3.3. Elevación.....	47
3.3.4. Curvatura.....	47
3.3.5. Litología.....	49
3.3.6. Distancia a redes de drenaje.....	50
3.3.7. Uso/cobertura de suelo.....	50
3.3.8. Densidad de fallas/lineamientos.....	51
3.4. Validación del modelo.....	52
4. RESULTADOS.....	56
4.1. Mapas de parámetros condicionantes.....	56
4.1.1. Grado de la pendiente.....	56

4.1.2. Orientación de la pendiente.....	57
4.1.3. Elevación.....	58
4.1.4. Curvatura.....	59
4.1.5. Litología.....	60
4.1.6. Distancia a redes de drenaje.....	62
4.1.7. Uso/cobertura de suelo.....	63
4.1.8. Densidad de fallas/lineamientos.....	63
4.2. Valores del modelo FR.....	65
4.2.1. Grado de la pendiente.....	66
4.2.2. Orientación de la pendiente.....	66
4.2.3. Elevación.....	67
4.2.4. Curvatura.....	68
4.2.5. Litología.....	69
4.2.6. Distancia a redes de drenaje.....	70
4.2.7. Uso/cobertura de suelo.....	71
4.2.8. Densidad de lineamientos/fallas.....	72
4.3. Mapas de susceptibilidad de RM.....	75
4.4. Validación de mapas por método AUC.....	83
5. DISCUSIÓN.....	87
5.1. Mapa de susceptibilidad vs realidad.....	87
5.2. Valores AUC.....	89
5.3. Análisis de susceptibilidad en sectores vulnerables.....	93
5.4. Planificación y futuro.....	99
6. CONCLUSIONES.....	102
7. REFERENCIAS.....	104
ANEXOS.....	122

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. 1. Mapa de ubicación y accesos.....	4
2. 1. Esquema de la nomenclatura de una remoción en masa.....	10
2. 2. Esquemas de ejemplificación de caída de roca.....	13
2. 3. Esquema del movimiento de un vuelco.....	14
2. 4. Esquema clásico de un deslizamiento rotacional.....	15
2. 5. Esquema de un deslizamiento traslacional.....	15
2. 6. Esquema de una extensión lateral.....	16
2. 7. Esquema de ejemplos de flujos.....	17
2. 8. Geomorfología de la región del Biobío.....	29
2. 9. Mapa geomorfológico de parte de la comuna de Concepción	32
2. 10. Gráfico de líneas que muestran las variaciones de temperatura máxima, media y mínima en Concepción.....	35
2. 11. Promedio mensual de precipitaciones en Concepción de 1966 hasta 2022.....	36
3. 1. Mapa del área de estudio con puntos del inventario de remociones en masa...	44
3. 2. Diagrama de la curvatura del perfil.....	48
3. 3. Diagrama de la curvatura en planta.....	48
3. 4. Esquemas de gráficos ROC y el AUC.....	55
4. 1. Mapa de grados de pendientes.....	57
4. 2. Mapa de orientación (aspecto) de pendientes.....	58
4. 3. Mapa de elevaciones del área de estudio.....	59
4. 4. Mapa de curvatura del área de estudio.....	60
4. 5. Mapa de litología del área de estudio.....	61
4. 6. Mapa de distancia a redes de drenaje área de estudio.....	62
4. 7. Mapa de uso/cobertura de suelo del área de estudio.....	63
4. 8. Mapas de densidad de fallas/lineamientos del área de estudio.....	65
4. 9. Diagrama de Clases vs FR del parámetro grado de la pendiente.....	66
4. 10. Diagrama de Clases vs FR del parámetro orientación de la pendiente.....	67
4. 11. Diagrama de Clases vs FR del parámetro elevación.....	68

4.	12.	Diagrama de Clases vs FR del parámetro curvatura.....	68
4.	13.	Diagrama de Clases vs FR del parámetro litología inicial.....	69
4.	14.	Diagrama de Clases vs FR del parámetro litología final usada.....	70
4.	15.	Diagrama de Clases vs FR del parámetro distancia a redes de drenaje.....	71
4.	16.	Diagrama de Clases vs FR del parámetro uso/cobertura de suelo.....	72
4.	17.	Diagrama de Clases vs FR del parámetro densidad de lineamientos propios.....	73
4.	18.	Diagrama de Clases vs FR del parámetro densidad de fallas/lineamientos Geología de Campo II.....	74
4.	19.	Diagrama de Clases vs FR del parámetro densidad de fallas/lineamientos Geología de Campo II + Lineamientos propios.....	75
4.	20.	Primer y segundo mapa de susceptibilidad del área de estudio.....	76
4.	21.	Tercer y cuarto mapa de susceptibilidad del área de estudio.....	77
4.	22.	Quinto y sexto mapa de susceptibilidad del área de estudio.....	79
4.	23.	Diagramas ROC y AUC de la tasa de éxito y predicción para los mapas N°1, 2 y 3.....	84
4.	24.	Diagramas ROC y AUC de la tasa de éxito y predicción para los mapas N°4, 5 y 6.....	85
5.	1.	Mapa de susceptibilidad del área de estudio.....	92
5.	2.	Mapa de susceptibilidad del área de estudio, ampliación en las comunas de Concepción y Chiguayante.....	93
5.	3.	Mapa de susceptibilidad del área de estudio, ampliación en la comuna de Hualqui.....	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
2.	1.	Clasificación de tipos de movimiento en masa general, considerando sus divisiones según su tipo de material..... 12
2.	2.	Temperaturas máximas, media, mínimas, y milímetros de precipitaciones en Concepción..... 34
2.	3.	Temperaturas máximas, media, mínimas, y milímetros de precipitaciones en Chiguayante..... 36
2.	4.	Temperaturas máximas, media, mínimas, y milímetros de precipitaciones en Hualqui..... 37
4.	1.	Clases de los mapas de densidad de fallas/lineamientos..... 64
4.	2.	Distribución de los factores de cada mapa de susceptibilidad..... 80
4.	3.	Valores del AUC de cada mapa de susceptibilidad..... 86

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía		Página
5.	1.	Remoción en masa detrás del patio de una casa, sector Nonguén, Concepción..... 95
5.	2.	Deslizamiento de tierra, cerca del sector Quilacoya, Hualqui..... 98
5.	3.	Deslizamiento de tierra en pendiente, en camino forestal, Hualqui..... 99

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo		Página
I.	Inventario corregido de puntos de remociones en masa del “Grupo de estudio Multiamenazas Biobío”	123
II.	Inventario propio de puntos de remociones en masa.....	135
III.	Tabla de cálculo de FR, FR y PR de cada parámetro	140

RESUMEN

Las remociones en masa han sido fenómenos ampliamente estudiados, en especial porque involucran las pérdidas de vidas humanas, obras de ingeniería, y pueden producir daños a los sectores que puedan ser afectados por éstas. En las comunas de Concepción, Chiguayante y Hualqui del Área Metropolitana de Concepción, ha habido factores desencadenantes como precipitaciones y sismos que han gatillado eventos de remociones en masa, pero, además, las comunas cuentan con factores naturales que condicionan el terreno que puede ser movilizados por los desencadenantes, además de que muchas de estas comunas cuentan con áreas urbanas que puedan ser afectadas por estos fenómenos. Es por esto, que en este trabajo se tiene como objetivo el poder identificar las áreas más propensas a fenómenos de remociones en masa, lo cual se busca realizar con un mapa de susceptibilidad de remociones en masa, herramienta que permite la evaluación y zonación del área de estudio en índices de susceptibilidad.

Para poder realizar el mapa de susceptibilidad, se realizó un filtro de un inventario de puntos de remociones en masa, creado por las prácticas en terreno de la Universidad de Concepción, enmarcadas en el “Grupo de estudio Multiamenazas Biobío”. A este filtrado, se agregó un conjunto de puntos propios de remociones en masa, los cuales fueron adquiridos mediante el trabajo de fotointerpretación de imágenes satelitales de Google Earth Pro. El método para la obtención del mapa es el *Frequency Ratio* (FR), método estadístico bivariado que toma mapas de parámetros condicionantes, además del inventario de puntos de remociones en masa, y procede al cálculo de variables y números, los cuales son ordenados en Microsoft Excel, para posteriormente ser calculados en la herramienta ArcMap 10.5, para la obtención final del mapa. Varios de los parámetros son de tipo topográfico, los cuales fueron obtenidos mediante el procesamiento de una imagen de un modelo de elevación digital (DEM) y herramientas de ArcToolbox de ArcMap 10.5, siendo estos los parámetros de grado de pendiente, orientación de pendiente, elevación y curvatura. A estos se sumaron un mapa litológico, creado por datos de años anteriores de cursos de Geología de Campo II; un mapa de densidad de redes de drenaje, hecho a partir de un *shapefile* de red hídrica del área de estudio del MINVU, un mapa de uso/cobertura de suelo, y tres mapas de densidad de debilidades estructurales, uno de lineamientos propios, otro de las fallas y lineamientos de los mapas de Geología de Campo II, y un tercer mapa que agrupaba las dos variables anteriores, esto para observar qué variable era más representativa en el modelo, y de qué manera influye la componente estructural.

Fueron creados 6 mapas para observar cuál era el que presentaba de mejor manera la zona. Además de esto, se usó un método de validación del mapa de susceptibilidad llamado Área Bajo la Curva (AUC). Existió la discriminación de parámetros y clases en la visualización de los datos, llegando al punto de omitir el parámetro de uso/cobertura de suelo, porque daba resultados poco coherentes en el área de estudio, y el de unir a las formaciones Quiriquina y Curanilahue, porque la primera presentaba una sobreestimación en el modelo final. Se determinó como el mapa más cercano a la realidad, y que presentaba una tasa de éxito y predicción de “muy bueno” al mapa con las densidades de fallas/lineamientos propios más los de Geología de Campo II. Con él, se pudo observar los sectores de las comunas que presentaban mayor susceptibilidad, además de poder caracterizar ciertas zonas.

El trabajo reafirma la afectación que sufren las comunas de Concepción, Chiguayante y Hualqui de procesos de remociones en masa, siendo los sectores de laderas de cerros los que poseen índices de susceptibilidad mayores. Esto se debe a las características generales que condicionan estos terrenos, siendo los grados de las pendientes, la litología y la elevación los que ejercen mayor peso. La adición del factor de debilidades estructurales dio como resultado mapas de susceptibilidad con mayor cantidad de zonas de mayor susceptibilidad, dando una mejor caracterización del modelo. Finalmente, el mapa de susceptibilidad puede ser usado para planificación territorial, precaución, como para mitigar futuros movimientos, además de radicar mucho la importancia con la comunidad para un trabajo continuo en el tiempo, y con un constante monitoreo.

1. INTRODUCCIÓN

Chile es un país históricamente afectado por procesos de remociones en masa (Marín y otros, 2018; Naranjo y otros, 2005; Sepúlveda y Serey, 2009). Las remociones en masa se definen como aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, suelo o derrubios (Cruden, 1991; USGS, 2004), siendo procesos gravitacionales (Cruden, 1991), representando así las formas más frecuentes de manifestaciones morfodinámicas de la inestabilidad de una ladera (Mardones y Rojas, 2012). Los factores que causan estos procesos son variados, pudiendo combinar factores geológicos, morfológicos, físicos, e incluso la acción antrópica (Cruden y Varnes, 1996). Con relación a las remociones en masa, se deben distinguir los factores condicionantes y desencadenantes. Los primeros, corresponden a los factores intrínsecos al propio terreno, también llamados factores “pasivos” (González de Vallejo y otros, 2002). Los segundos, corresponden a los factores externos que generan un estímulo, y provocan una remoción en masa de manera inmediata (Wieczorek, 1996).

Una de las formas más usadas para dar a conocer las zonas que puedan ser afectadas por las remociones en masa, son los mapas de susceptibilidad, los que, según Brabb (1984), van a representar las áreas con más probabilidades de que se desencadenen remociones en masa en el futuro. En este tipo de mapa, para su elaboración, es necesario un análisis y superposición de los factores que van a condicionar un área, como las pendientes, composición de la litología, meteorización, entre otros (González de Vallejo y otros, 2002).

En Chile, existen localidades y comunas emplazadas en sectores con pendientes de moderadas a fuertes, como también en suelo con material más propenso a los derrumbes, incidiendo en la ocurrencia de estos fenómenos. Las comunas de Concepción, Chiguayante y Hualqui del Área Metropolitana de Concepción (AMC) poseen cerros y sectores con altas pendientes, además de fuertes precipitaciones, que crean el ambiente propicio e ideal para el desencadenamiento de remociones en masa, las cuales han provocado diversos accidentes, como el corte de caminos, destrucción de viviendas, e incluso víctimas fatales, estando documentado en trabajos (Mardones y Rojas, 2012; Naranjo y otros, 2006a; Naranjo y otros, 2006b), prensa local pública, y trabajos correspondiente a tesis (Gajardo, 2022). Sumado a lo anterior, se tiene la ocurrencia de fallas geológicas (Vivallos y otros, 2010), las cuales no han sido estudiadas desde la perspectiva de las remociones en masa en las comunas.

A raíz de esto, se propone la evaluación, tanto en terreno, como por fotointerpretación y recopilación bibliográfica, de eventos de remociones en masa en Concepción, Chiguayante y Hualqui; además de un trabajo mediante ArcMap 10.5, para la creación de un mapa de susceptibilidad del área de estudio de escala 1:100.000, y así poder evaluar los diferentes grados de susceptibilidad, pudiendo caracterizar cada zona de las tres comunas. La construcción del mapa de susceptibilidad se llevará a cabo mediante un método estadístico bivariado, el cual, posteriormente, va a ser validado tanto la tasa de éxito que posea el mapa, como la capacidad de predicción de nuevos eventos. Este trabajo incluye, por primera vez, fallas geológicas en la definición de susceptibilidad para el AMC. Con esto, se apunta a obtener una visión más acabada de las zonas más susceptibles de experimentar remociones en masa en el AMC. En tiempos en que los eventos de precipitación intensa tienden a ser más recurrentes, se espera que los resultados aquí expuestos permitan contribuir a una mejor planificación urbana.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Establecer un rango de niveles de susceptibilidad en el origen de remociones en masa en todas las áreas de las comunas de Concepción, Chiguayante y Hualqui, integrando a las debilidades estructurales como una variable más.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Actualizar el catálogo de remociones en masa para el AMC.
- Caracterizar morfológicamente las comunas de Concepción, Chiguayante y Hualqui del AMC (parámetros considerados).
- Cuantificar la influencia de los diversos parámetros que más control ejercen en la generación de remociones en masa.
- Evaluar la coherencia de distintos mapas de susceptibilidad.

1.2. Ubicación y accesos

El área de estudio comprende tres comunas del AMC, dentro de la región del Biobío. A su vez, todas las comunas estudiadas forman parte de la Provincia de Concepción.

La comuna de Concepción, al oeste del área de estudio, posee un acceso desde la comuna de Talcahuano hacia el sureste por la ruta 154 (Autopista Concepción-Talcahuano), otro acceso por autopista desde la comuna de Penco al suroeste por la ruta 150, cercano a éste hay una entrada por la Autopista Interportuaria con dirección al suroeste con dirección hacia el Aeropuerto Carriel Sur, otra entrada es por el sector de Collao accediendo al este por la ruta 146, y el último acceso es a través de la comuna de San Pedro de la Paz hacia el noreste por los puentes Juan Pablo II, Llacolén y Chacabuco.

Más al este, se encuentra la comuna de Chiguayante, cuyos accesos son desde la comuna de Concepción hacia el sureste. Uno de los accesos es directo desde la Avenida Costanera, y otro es por la Avenida Pedro de Valdivia, la cual atraviesa el sector del mismo nombre.

Finalmente, la comuna de Hualqui es la que se encuentra al este del área de estudio, teniendo tres entradas: la principal es desde la comuna de Chiguayante con dirección hacia el este por la Avenida

Manuel Rodríguez (O-60), la otra entrada es desde el norte, desviándose desde la ruta 146, cerca del sector El Pino por la ruta O-680, hacia el sur; y el otro desvío desde la ruta 146 es cerca de Copiulemu, con dirección al suroeste, entrando a la ruta O-670, y posteriormente accediendo a la ruta O-680 por la calle Camino El Águila.

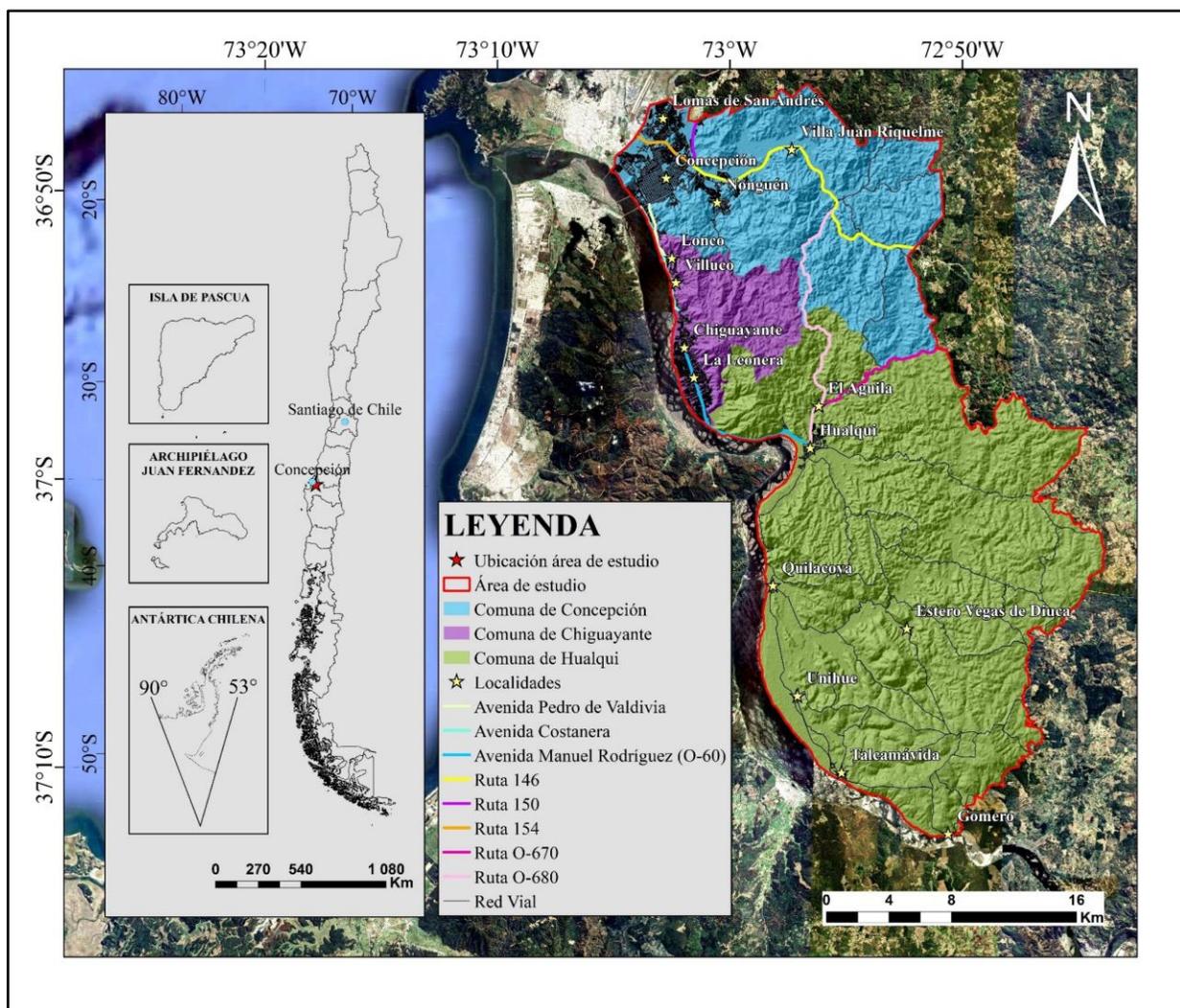


Figura 1.1: Mapa de ubicación y accesos. El área de estudio corresponde a la zona del polígono rojo, el cual se encuentra dividido en las 3 comunas a estudiar. Dentro de cada comuna están especificadas las rutas de acceso, la red vial del área urbana, y ciertas localidades para facilitar la ubicación en ciertas áreas de la comuna.

1.3. Trabajos anteriores

Existen diversos estudios de remociones en masa en el AMC, como el de Naranjo y otros (2006a) que estudian las remociones en masa por las lluvias de los días 9 al 11 de julio de 2006, y Naranjo y otros (2006b) los que analizan las remociones producto de las lluvias torrenciales del 26 y 27 de junio de 2005. Estos dos años tuvieron índices fuertes de precipitaciones, provocando el cobro de víctimas fatales, además de destrozos a viviendas y propiedad pública. Creixell y otros (2010) estudian los procesos de remociones en masa en la comuna de Concepción, pero a través del factor de los sismos, inducidos por el terremoto del 27 de febrero del 2010. De la misma manera lo hacen Mardones y Rojas (2012), ampliando el nivel de estudio a toda la región del Biobío. Flores (2010) también hace estudios relacionados con el terremoto del 27 de febrero del 2010, analizando 11 procesos de remociones en masa en el litoral de Concepción. Marín y otros (2018) hacen un catastro de las víctimas fatales por procesos de remociones en masa en todo el país, entre los años 1928 y 2017, contabilizando 28 víctimas fatales en la región del Biobío.

Refiriéndose directamente a la región del Biobío, y a los trabajos que han buscado zonificar las áreas más susceptibles a sufrir remociones en masa, éstos han sido pocos. El único artículo público es el de Mella (2017), el cual zonifica la comuna de Talcahuano por las remociones en masa en campamentos. Todos los demás trabajos de susceptibilidad de estos procesos en la región han sido de tesis o memorias de título: Vergara (2020) hace un análisis y zonificación de la susceptibilidad de remociones en masa del embalse Ralco, en la comuna del Alto Biobío; Castillo (2021) hace lo mismo en la localidad de Cocholgue en Tomé; y Gajardo (2022) determina los grados de susceptibilidad en las comunas de Talcahuano, Hualpén, Concepción y Chiguayante. El presente trabajo analiza la susceptibilidad de remociones en masa de las comunas de Concepción y Chiguayante, y es el primero en zonificar la comuna de Hualqui.

1.4. Agradecimientos

Primero que nada, quiero agradecer al profesor Joaquín Cortés, por darme la oportunidad de realizar mi memoria de título, y por todo el apoyo y paciencia entregada a la hora de responder dudas en las reuniones efectuadas, por siempre darse el tiempo cuando requería de su ayuda, además de los conocimientos entregados a lo largo de mis años de carrera. Agradezco a la profesora Edilia Jaque por la buena disponibilidad, y por ese apoyo y reuniones de trabajo, las que siempre eran agradables, y ayudaron en el enfoque de este trabajo. A mi profesional guía, Francisco Castro, por ser un buen profesional y amigo, y por todo el apoyo entregado cuando tenía dudas de cómo continuar. Agradezco al proyecto “Análisis de multiamenazas en contextos metropolitanos costeros: aportes para la construcción de resiliencia en escenarios de cambio climático (VRID 2021000383MUL)” por el financiamiento para la realización de este trabajo, y al “Grupo de estudio Multiamenazas Biobío” por el apoyo entregado, e información para poder llevar a cabo el estudio.

También quiero agradecer a todos los docentes y trabajadores del Departamento Ciencias de la Tierra con los que crucé caminos, por los años de aprendizaje y sabiduría, y también por esas charlas en las oficinas o pasillos, tanto de la carrera, como de cosas cotidianas. Muchas gracias.

A mi querido grupo de amigos del colegio, por seguir siendo parte de mi vida después de todos estos años; por las risas, reuniones, y también momentos más serios que hemos tenido en este camino más adulto, con el que hemos crecido todos. A mis amistades que hice en la carrera, ya que muchos aportaron sabiduría, buenos consejos, y momentos que voy a recordar cuando mire atrás.

Finalmente, nada de este trabajo, además del camino que quise recorrer en esta carrera, podrían haber sido posible sin el apoyo incondicional de toda mi familia. Quiero hacer especial mención a cuatro personas: A Claudia y Christian, mis dos hermanos mayores, porque siempre estuvieron presentes en mi vida, dando consejos cuando lo necesitaba, charlas que al crecer fueron adquiriendo más madurez, y por quererme siempre como su hermano menor. Por último, pero no menos importante, a Armando y Yanet, mis padres, mis dos pilares, por quererme desde siempre, por apoyarme en mis proyectos, incluso cuando no sabían nada acerca del camino profesional que quise seguir; por los consejos, las idas a buscar cuando tenía que quedarme a trabajar hasta tarde, por los debates en los que muchas veces diferimos de opiniones, pero sobre todo por su apoyo y amor incondicional, que he tenido la suerte de seguir sintiendo hasta el día de hoy.

2. ANTECEDENTES

2.1. Marco teórico para los procesos de RM

2.1.1. Conceptos generales de las RM

2.1.1.1. Factores condicionantes

Los factores condicionantes o “pasivos”, son aquellos intrínsecos al terreno natural, siendo los que determinan la resistencia y el comportamiento que va a tener el talud. Dentro de estos factores, las propiedades físicas y resistentes del material de una ladera, además de las características morfológicas y geométricas de ésta, van a ser las que cobren importancia para la tendencia de la ladera a la inestabilidad (González de Vallejo y otros, 2002).

La superposición de estos factores es un enfoque que reconoce que las remociones en masa son la combinación de diferentes factores o elementos que producen estos fenómenos (Simons y otros, 1978), siendo usado en la creación de mapas, para poder establecer el grado de susceptibilidad en una determinada zona, en base al peso otorgado a cada factor (González de Vallejo y otros, 2002).

2.1.1.2. Factores desencadenantes

Los factores o mecanismos desencadenantes son aquellos estímulos externos que provocan una remoción en masa de manera casi inmediata, ya sea por el aumento veloz de las tensiones, o la reducción de la fuerza del material contenido en una pendiente. Aunque estos factores son los que gatillarían una remoción en masa, puede darse el caso de que no tengan participación alguna, y el movimiento sea por la acumulación de otras causas, como erosión química o física del material, lo que progresivamente lleve al material a ser movilizado (Wieczorek, 1996). Así mismo, Wieczorek (1996) menciona que “el breve período requerido de causa y efecto es el elemento crítico en la identificación del desencadenante de una remoción en masa”.

2.1.1.3. Susceptibilidad

La susceptibilidad de remociones en masa es la probabilidad de que ocurra una remoción en masa en un área, siendo en función de las condiciones locales que posea el terreno (Brabb, 1984; Soeters y Van Westen, 1996). Fell y otros (2008) se basan en una definición hecha por la IUGS (1997), y consideran a la susceptibilidad como una evaluación cuantitativa o cualitativa de la clasificación,

volumen o área, y la distribución espacial de las remociones en masa existentes, o aquellas que tengan el potencial de ocurrir en un área.

2.1.1.4. Peligro

Una descripción antigua pero aún usada es la de Varnes (1984), quien describe al peligro natural como la probabilidad de la ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino, dentro de un período de tiempo dado, y en un área específica. Fell y otros (2008) definen el peligro como una condición, la cual posee el potencial de causar consecuencias no deseadas, habiendo varios elementos potencialmente afectados, como lo son la población, infraestructura y obras de ingeniería, actividad económica, servicios públicos, y valores ambientales.

Para la evaluación y descripción de los peligros, en este caso, de remociones en masa, hay que tener en cuenta la ubicación, cuándo ocurrieron dichos procesos en el pasado, su intensidad y magnitud, zonas con posibilidad de procesos futuros, y la frecuencia de ocurrencia (González de Vallejo y otros, 2002). Fell y otros (2008) incluyen el volumen o área, la clasificación y velocidad de las posibles remociones en masa y material que se pueda movilizar, y la probabilidad temporal.

2.1.1.5. Riesgo

Hay dos conceptos diferentes para el riesgo, los cuales fueron definidos por Varnes (1984). El primero de estos es el “riesgo específico”, el cual Varnes (1984) menciona que es “el grado de pérdida debido a un fenómeno particular”, y que puede ser expresado como el producto entre el peligro natural (H), y la vulnerabilidad (V). El segundo concepto es el “riesgo total”, definido como el número que se espera de pérdida de vidas, personas heridas, daños a propiedad o la interrupción de actividades económicas, todo esto debido a un fenómeno natural en particular, siendo el producto entre el riesgo específico, y los elementos en riesgo (E) (Varnes, 1984).

2.1.1.6. Vulnerabilidad

Es el grado de pérdida de un elemento o conjunto de elementos en un área afectada por la acción de un fenómeno, en este caso, de una remoción en masa. Su evaluación es mediante una escala de 0 a 1, siendo respectivamente “sin daño o sin pérdida” y “pérdida o destrucción total” (González de Vallejo y otros, 2002; Fell y otros, 2008).

2.1.1.7. Zonificación

Es la distribución de un sector en áreas o dominios homogéneos, además de la clasificación mediante los grados de susceptibilidad, peligro o riesgo de remociones en masa. La zonificación es diferente, lo que depende si se está estudiando la susceptibilidad, peligro o riesgo de las remociones en masa. Específicamente, para la zonificación de la susceptibilidad, va a involucrar la clasificación, área o volumen, y distribución espacial de las remociones en masa, tanto las que ya existen, como también las potenciales que ocurran en el área estudiada (Fell y otros, 2008).

2.1.2. Remociones en masa

2.1.2.1. Generalidades

Una definición informal para las remociones en masa es que éstas son procesos gravitacionales, en los que una masa de roca, suelo o derrubios son transportados ladera abajo (Cruden, 1991; Cruden y Varnes, 1996). Las remociones en masa no están limitadas solo a la tierra, además de que no se refieren solamente a los deslizamientos de tierra, lo que se entendería de la traducción literal de *landslides*, ya que ésta es una palabra norteamericana formada por dos palabras (*land*, traducido como “tierra”, y *slides*, como “deslizamientos”), que, al unirse, tiene un significado diferente (Cruden, 1991). Las remociones en masa, según Cruden y Varnes (1996), son reactivas si aún están moviéndose, lo que incluye tanto una remoción por primera vez de una zona, o una reactivación; si la remoción vuelve a estar activa después de estar inactiva, pasa a estar reactivada; y si la remoción en masa no se ha movilizadado hace más de un ciclo anual o hace temporadas, pasa a ser inactiva.

Varnes (1978) y la IAEG *Comission on Landslides* (1990) han realizado diagramas mostrando las características observables de las remociones en masa. Varnes (1978) creó el diagrama de un *complex earth slide-earth flow*, o de un deslizamiento-flujo de tierra complejo (Figura 2.1). La nomenclatura de las remociones en masa, sugerida por la IAEG *Comission Of Landslides* (1990) son de la clasificación de Varnes (1978), sin embargo, Cruden y Varnes (1996) agregan algunas definiciones y amplían otras. Para la nomenclatura usada en el diagrama modificado de la figura 2.1, las definiciones usadas fueron las de Cruden y Varnes (1996), que son las siguientes:

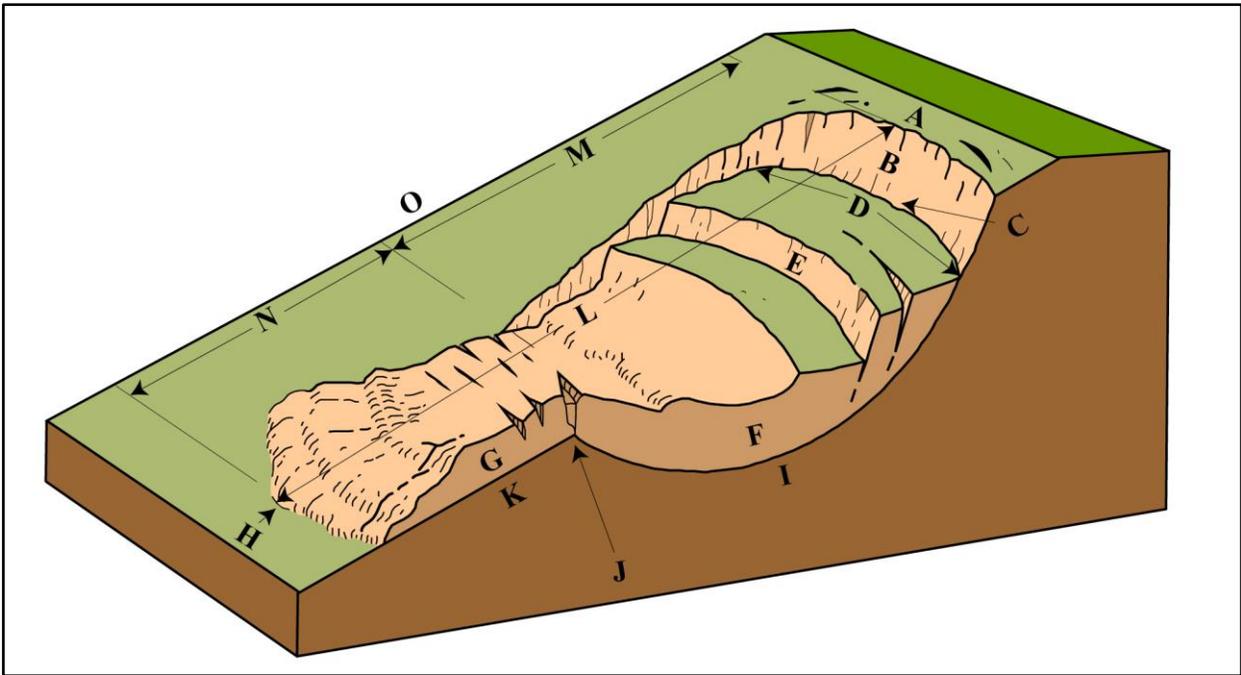


Figura 2.1: Esquema de la nomenclatura de una remoción en masa. Modificado de Varnes (1978).

- A. Corona: material no desplazado, que está adyacente a la parte más alta del escarpe principal.
- B. Escarpe principal: superficie empinada en el suelo no movilizado en el borde superior de la remoción en masa, causada por el movimiento del material desplazado. Es la parte visible de la superficie de ruptura.
- C. Cima: punto de contacto más alto entre el material desplazado y el escarpe principal.
- D. Cabeza: partes superiores de la remoción en masa, a lo largo del contacto entre el material desplazado y el escarpe principal.
- E. Escarpe menor: superficie empinada sobre el material emplazado en la remoción en masa, producto de movimientos diferenciales dentro del material desplazado.
- F. Cuerpo principal: zona del material desplazado de la remoción en masa, el que se superpone a la superficie de ruptura entre el escarpe principal y el pie de la superficie de ruptura.
- G. Base: porción de la remoción en masa que se ha movilizado más allá del pie de la superficie de ruptura, y se superpone a la superficie original del suelo.

H. Punta o pie: margen inferior, generalmente curvo, del material desplazado de una remoción en masa, siendo el punto más alejado del escarpe principal.

I. Superficie de ruptura: superficie que forma, o formó, el límite inferior del material desplazado debajo de la superficie original del suelo.

J. Pie de la superficie de ruptura: intersección entre la parte inferior de la superficie de ruptura de una remoción en masa, y la superficie original del suelo.

K. Superficie de separación: parte de la superficie original del suelo, que se encuentra superpuesta por la base de la remoción en masa.

L. Material desplazado: material que fue desplazado de su posición original en la pendiente, por movimientos de remoción en masa.

M. Zona de agotamiento: área de la remoción en masa, en donde el material desplazado se encuentra debajo de la superficie original del suelo.

N. Zona de acumulación: área de la remoción en masa, en donde el material desplazado se encuentra por encima de la superficie original del suelo.

O. Superficie original del suelo: superficie de la pendiente que existía antes de que la remoción en masa ocurriera.

2.1.2.2. Tipos

Hay una serie de clasificaciones de las remociones en masa, las que varían dependiendo de las características tomadas en cuenta de los autores al momento de describir su clasificación. Los sistemas de clasificación más usados tanto en América del Norte, como en otros continentes (Hungry y otros, 2013), son las clasificaciones de Varnes (1978) y la de Cruden y Varnes (1996). Para este trabajo, se considerará la clasificación inicial de Varnes (1978), mostrada en la tabla 2.1, pero agregando algunas modificaciones hechas por Cruden y Varnes (1996) y complemento de otras fuentes.

Tabla 2.1: Clasificación de tipos de movimiento en masa general, considerando sus divisiones según su tipo de material. Modificado de Varnes (1978).

TIPO DE MOVIMIENTO		TIPO DE MATERIAL		
		ROCA MADRE	SUELOS PARA INGENIERÍA	
			Predominantemente grueso	Predominantemente fino
Caída		Caída de roca	Caída de detritos	Caída de tierra
Vuelco		Caída de roca	Vuelco de detritos	Vuelco de tierra
Deslizamiento	rotacional	Deslizamiento de roca	Deslizamiento de detritos	Deslizamiento de tierra
	traslacional			
Extensión lateral		Extensión de roca	Extensión de detritos	Extensión de tierra
Flujo		Flujo de roca	Flujo de detritos	Flujo de tierra
Complejo		Combinación de dos o más tipos principales de movimientos		

A. Caída (*fall*)

En este tipo de remoción en masa, el material, suelo o roca, se desprende de una ladera a lo largo de una superficie donde hay poco o ningún desplazamiento por corte, finalmente cayendo por aire, posteriormente pudiendo rebotar o rodar (Figura 2.2). A excepción de cuando el material está siendo socavado, momento en el que la caída es precedida por movimientos menores de deslizamiento o vuelco que separan el material desplazado del material no perturbado, la velocidad del movimiento de caída es de muy rápida a extremadamente rápida (Varnes, 1978; Cruden y Varnes, 1996).

El movimiento de caída puede ocurrir en laderas naturales como artificiales, teniendo como característica común el tener una fuerte inclinación (Alcántara-Ayala, 2000). Según Cruden y Varnes (1996), por sobre los 76° de pendiente, es suficiente para que el material caiga por caída libre (Figura 2.2.a); y en pendientes con ángulos de 45° , generalmente el movimiento es por rebote y posterior rodamiento del material (Figura 2.2.b).

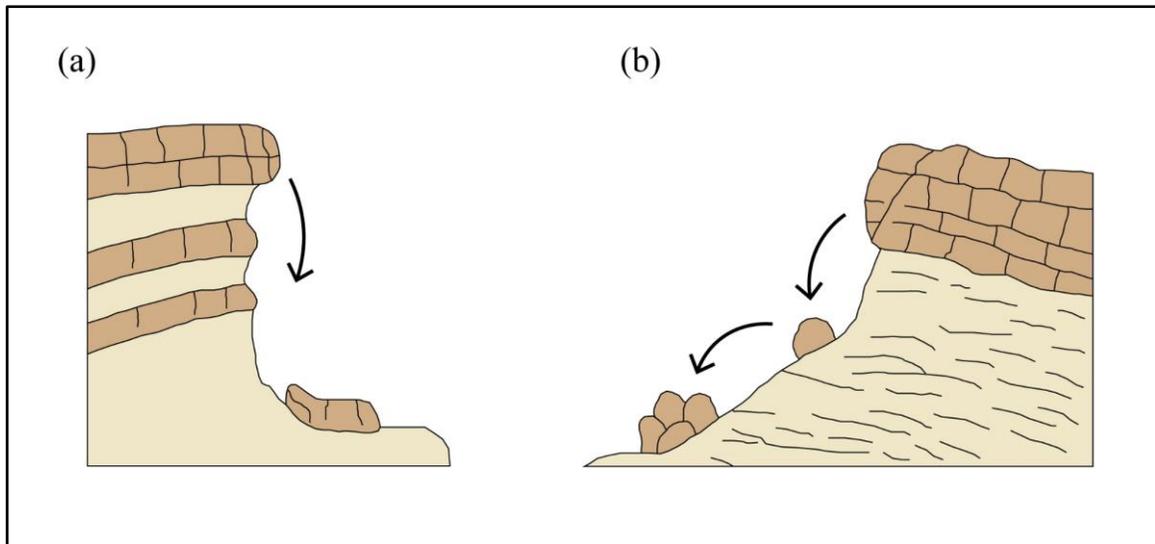


Figura 2.2: Esquemas de ejemplificación de caída de roca. (a) Caída en pendientes de tipo acantilado, donde el material cae por caída libre. (b) Caída de roca en ángulos menos pronunciados que evidencian las características de rebote y rodamiento. Modificado de González de Vallejo y otros (2002).

B. Vuelco (*topple*)

El vuelco es el movimiento en el cual el material de una pendiente, siendo este suelo o roca, rota hacia adelante en torno a un eje bajo el centro de gravedad del material que está siendo desplazado (Varnes, 1978; Cruden y Varnes, 1996). El vuelco puede ser producido por acción de la gravedad (Varnes, 1978) que ejerce el material pendiente arriba de la masa que está siendo desplazada (Cruden y Varnes, 1996), o bien por agua o hielo infiltrado en las grietas de la masa (Cruden y Varnes, 1996).

La velocidad de este tipo de movimiento es, desde extremadamente lenta, hasta extremadamente rápida, pudiendo aumentar la velocidad mientras el material está en movimiento (Cruden y Varnes, 1996). Como el movimiento es hacia adelante, involucra cierta inclinación del material desplazado (Alcántara-Ayala, 2000), como muestra la figura 2.3, pero puede darse el caso que no se produzca el colapso (Varnes, 1978; Alcántara-Ayala, 2000). Además, dependiendo de la geometría de la masa movilizada, puede o no acabar su movimiento en una caída o deslizamiento (Varnes, 1978; Cruden y Varnes, 1996).

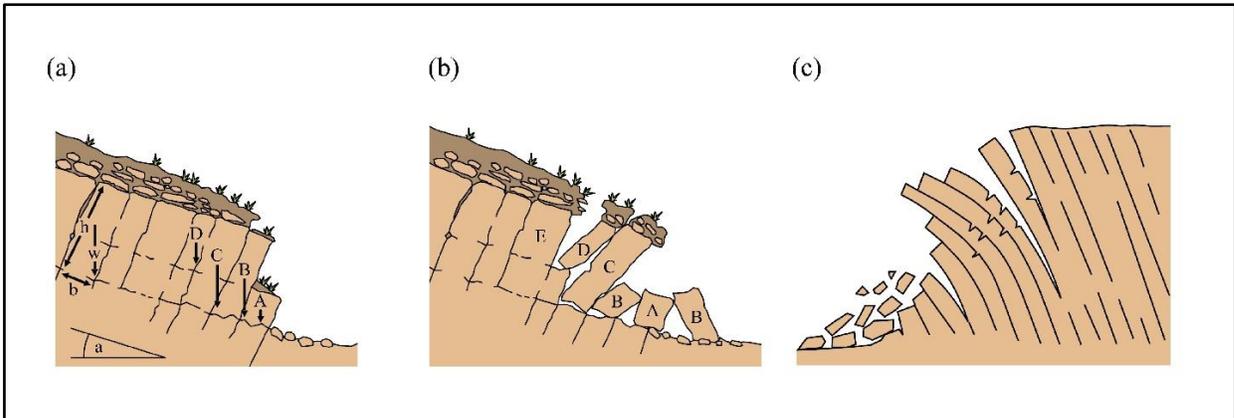


Figura 2.3: Esquema del movimiento de un vuelco. (a) Inicio del movimiento de bloques con superficies desprendidas. (b) Final del vuelco, evidenciando un cambio de posición de algunos bloques. (c) Vuelco de tipo flexural. Modificado de PMA:GCA (2007).

C. Deslizamiento (*slide*)

Esta remoción en masa involucra que una masa rocosa, o de suelo, se movilice ladera abajo sobre una superficie de ruptura, o de zonas delgadas con una alta tensión de corte (Cruden y Varnes, 1996). Generalmente, el movimiento es gradual, no ocurriendo inicialmente a la vez sobre lo que eventualmente se convierte en la superficie de ruptura, sino que el material movilizado va aumentando desde un área de falla local (Varnes, 1978; Cruden y Varnes, 1996). Normalmente, la existencia de grietas en la superficie de terreno son los primeros signos de este tipo de movimiento, estando estas grietas en el lugar que posteriormente ocupará el escarpe principal del deslizamiento (Cruden y Varnes, 1996; Alcántara-Ayala, 2000). Varnes (1978) realizó una clasificación de dos tipos de deslizamientos.

a. Deslizamiento rotacional

La particularidad visible de este deslizamiento es que la superficie de ruptura, sobre la que el material está siendo desplazado, tiene forma curva y cóncava (Cruden y Varnes, 1996; PMA:GCA, 2007), lo cual incide en que el material pueda deslizarse sin mucha deformación interna (Cruden y Varnes, 1996). La morfología de este tipo de deslizamiento es muy singular, con un pronunciado escarpe principal, y “una contrapendiente de la superficie de la cabeza del deslizamiento hacia el escarpe principal”, como evidencia la figura 2.4 (PMA:GCA, 2007). El deslizamiento rotacional ocurre generalmente en materiales homogéneos (Cruden y Varnes, 1996), y su velocidad es de lenta a rápida, siendo velocidades menores a 1 m/s (PMA:GCA, 2007).

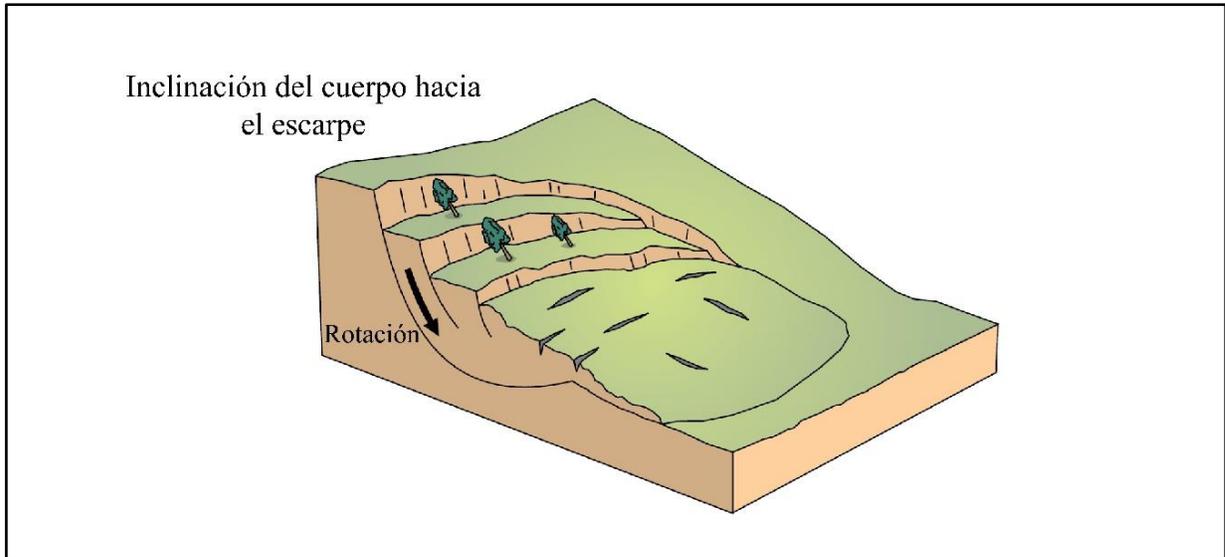


Figura 2.4: Esquema clásico de un deslizamiento rotacional. Modificado de PMA:GCA (2007).

b. Deslizamiento traslacional

Este tipo de deslizamiento, a diferencia del rotacional, el material es desplazado sobre una superficie de ruptura plana u ondulada (Cruden y Varnes, 1996; PMA:GCA, 2007) (Figura 2.5). El movimiento es menos profundo, siendo más superficial (Alcántara-Ayala, 2000), además de que el material tiende a desplazarse a lo largo de fallas, diaclasas, planos de estratificación o contacto entre la roca y el material transportado (Cruden y Varnes, 1996). Su velocidad va desde rápida a extremadamente rápida (PMA:GCA, 2007).

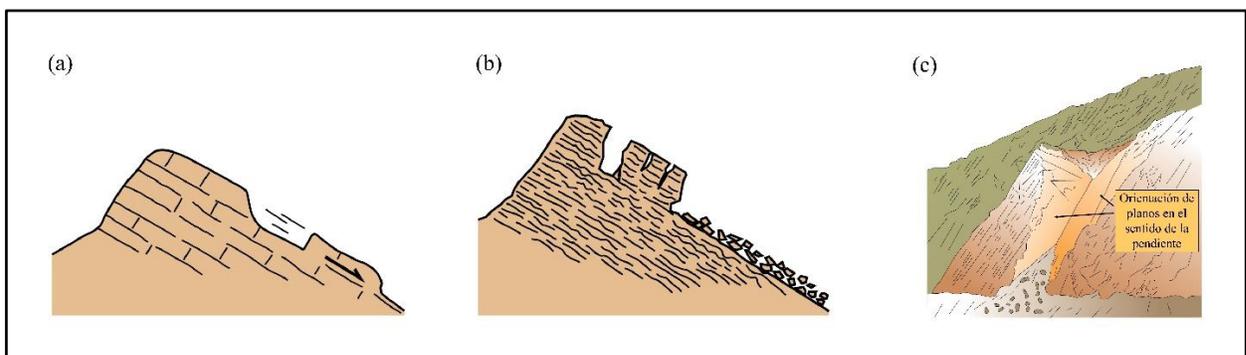


Figura 2.5: Esquema de un deslizamiento traslacional. (a) Deslizamiento de un bloque de roca. (b) Deslizamiento de suelo que se desprende de la ladera. (c) Deslizamiento en cuña. Modificado de PMA:GCA (2007).

D. Extensión lateral (*lateral spread*)

En esta remoción en masa, como su nombre indica, el movimiento es la extensión lateral acomodada por fracturas de cizalle o tracción (Varnes, 1978), y son distinguibles por ocurrir en pendientes menores o terreno plano (USGS, 2004) (Figura 2.6). El movimiento de esta remoción en masa implica la fractura y extensión de material coherente, roca o suelo, producto de la licuefacción o flujo plástico del material subyacente, provocando que el material superior coherente se hunda, traslade, rompa o desintegre, o bien puede fluir (USGS, 2004; Varnes, 1978). La fractura es provocada por el movimiento rápido del suelo, como el originado por terremotos, aunque también puede moverse por inducción artificial (USGS, 2004). El material subyacente que pasa de un estado sólido a comportarse como líquido, es de tipo saturado, suelto y sin cohesión, por lo general siendo arenas y limos (USGS, 2004). Como los mecanismos de falla pueden involucrar elementos de flujo, podrían considerarse de tipo complejo, sin embargo, al ser tan distintivas y, en ciertas situaciones, dominantes, se les hace un reconocimiento específico (Varnes, 1978).

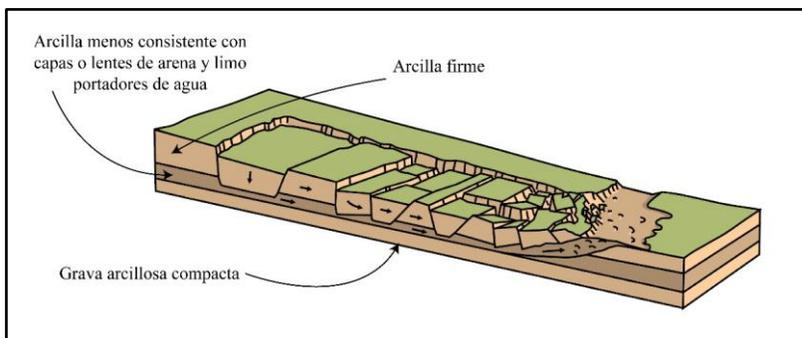


Figura 2.6: Esquema de una extensión lateral. Modificado de PMA:GCA (2007).

E. Flujo (*flow*)

Estos tipos de remociones en masa poseen un comportamiento similar a un fluido, pudiendo ser rápidos o lentos, húmedos o secos (Varnes, 1978). El material se desplaza mediante un movimiento continuo, asemejándose a un líquido viscoso por la distribución de velocidades, las superficies de ruptura duran poco, y por lo general no se conservan (Cruden y Varnes, 1996). Se da el caso que el flujo sea la evolución de otro tipo de remoción en masa, generalmente siendo el movimiento inicial un deslizamiento o una caída (Varnes, 1978; Cruden y Varnes, 1996) dependiendo de varios factores en cada caso, siendo el contenido de agua el factor común entre estos dos tipos de remociones (Cruden y Varnes, 1996).

Hay varias clasificaciones de flujos, generalmente relacionada con el tamaño de grano que está siendo movilizado, y los cuales son nombrados por el material en cuestión. Así, tenemos los flujos

de barro (*mud flow*), flujo de detritos (*debris flows*) (Figura 2.7.a), avalancha de detritos (*debris avalanche*) (Figura 2.7.b), flujos de tierra (*earth flow*) (Figura 2.7.c), y avalancha de rocas (*rock avalanche*) (Cruden y Varnes, 1996; PMA:GCA, 2007).

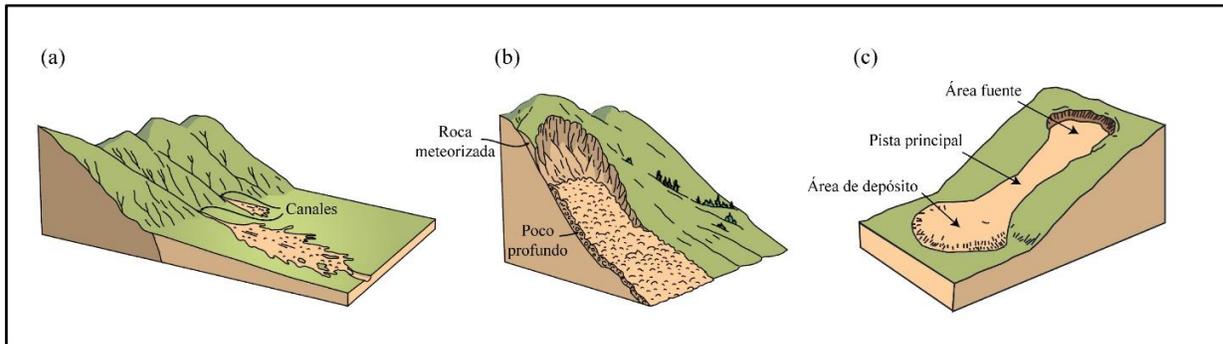


Figura 2.7: Esquema de ejemplos de flujos. (a) Flujo de detritos. (b) Avalancha de detritos. Modificado de PMA:GCA (2007) (c) Flujos de tierra. Modificado de USGS (2004).

2.1.2.3. Factores condicionantes

A. Pendiente

La pendiente es “la medida de inclinación de la superficie, y es medida en grados”, siendo el rango entre 0° y 90° , indicando la zona más plana y la más vertical, respectivamente (Yilmaz y otros, 2012). Ha sido considerado como uno de los factores más evaluados en la ocurrencia de remociones en masa (Çellek, 2020; Prasad, 1995). Esto radica en su incidencia en la formación, desarrollo y susceptibilidad a las remociones en masa, tanto así, que es un parámetro de entrada para la mayoría de los estudios de susceptibilidad (Yomrahoglu, 2000 en Çellek, 2020), ya que controla por completo el movimiento de las remociones mediante la acción de gravedad, y es evaluado en la clasificación de los parámetros topográficos (Çellek, 2020).

B. Litología

La litología entra en los factores geológicos, y es uno de los más importantes al revisar y estudiar las remociones en masa, por el material que conforma a las pendientes, tanto el suelo o roca (Trisnawati y otros, 2022). Por lo general, la cantidad de remociones en masa va a ser mayor si la resistencia de la roca es menor (Chen y otros, 2011), como lo es en el caso, por ejemplo, de arcillas (Cruden y Varnes, 1996), lutitas fracturadas, areniscas erosionadas (Bhandari y Dhakal, 2018), o incluso materia orgánica (Cruden y Varnes, 1996).

La meteorización de las unidades litológicas es un factor que hay que tener en cuenta. Se debe a que la exposición de la litología a fuentes de agua, como la infiltración (Baldermann y otros, 2021) o la exposición a la intemperie (Pánek, 2020) puede provocar una meteorización química de los minerales de una roca, alterándolos a minerales arcillosos, lo que reduce la resistencia de la litología, facilitando la formación posterior de remociones en masa (Swanston, 1978; Baldermann y otros, 2021). Generalmente, los procesos de meteorización de una roca son por la mezcla de los factores de precipitaciones, pendiente, estructuras geológicas y la litología (Trisnawati y otros, 2022).

Todo lo anterior hace que, cuando las propiedades litológicas se convierten en un factor condicionante relevante en un área de estudio, un mapa litológico sea indispensable. Muchas veces se da el caso que este mapa no se encuentre directamente disponible, por lo que, con el trabajo de campo, junto con el trabajo de gabinete de recopilación de datos, es posible obtener un mapa litológico coherente (Henriques y otros, 2015).

C. Debilidades estructurales

El factor de debilidades estructurales es uno que no siempre es considerado como un condicionantes de remociones en masa, sin embargo, no es un factor nuevo. Mergili y otros (2015) considera, dentro de la situación sismotectónica, a los sistemas de fallas en las rocas como un factor de disposición que aumenta la incidencia de remociones en masa, además de que, a lo largo de fallas tectónicas, se pueden formar planos de deslizamiento de material. Así también se ha considerado que la existencia previa de discontinuidades en las laderas, o en un macizo rocoso, seguido de la acción de la gravedad en laderas empinadas, produciría rupturas y fallas progresivas que ocasionarían los procesos de remociones en masa, por lo que, un estudio de las características estructurales de un terreno puede estimar los riesgos y peligros tanto de la infraestructura, como de la vida (Vick y otros, 2020).

Sumado a lo anterior, Cruden y Varnes (1996) menciona la posibilidad de la relación de discontinuidades estructurales, con el debilitamiento del material rocoso o suelo.

D. Hidrogeología

La acción de la hidrología en procesos de remociones en masa ha sido estudiada y comprobada, pero la hidrogeología genera algunas incógnitas (Thirard y otros, 2020). El agua actúa sobre los

materiales, debido a que reduce la resistencia al corte de éstos tanto por las presiones intersticiales que se generan, como también al disminuir los parámetros de resistencia en ciertos suelos (González de Vallejo y otros, 2002). Los estudios de la hidrogeología requieren estudiar y poner atención tanto en los flujos de agua superficiales, como en los subterráneos (Thirard y otros, 2020), siendo la dinámica de estos últimos el resultado de las interacciones de aportes de lluvia, propiedades físicas y heterogeneidad de los suelos y roca, geomorfología local, vegetación y biomasa asociada (Sidle y otros, 2019).

E. Vegetación

La vegetación ha sido estudiada como un factor que disminuye la ocurrencia de remociones en masa (Widjaja, 2018; Zhang y otros, 2022) al hacer a los suelos más cohesivos y estabilizar las laderas, producto de la absorción de agua de las precipitaciones por la interceptación y evapotranspiración de las copas de árboles, además del refuerzo que generan las raíces en el suelo (Zhang y otros, 2022), generando estas raíces el refuerzo necesario, incluso en pendientes con ángulos altos (Riestenberg y Sovonick-Dunford, 1983). De hecho, se ha estudiado la plantación de árboles con maderas duras y raíces fuertes como medida para prevenir las remociones en masa, haciendo que la planta absorba agua, y las raíces se unan al suelo (Widjaja, 2018). Esto nos habla de que, las remociones son más susceptibles en zonas donde la vegetación es escasa (García-Rodríguez y otros, 2008).

Existe otro impacto de la vegetación, que tiene relación directa con el factor antrópico, el cual es la plantación de monocultivos de bosques y siembra agrícola, que degradarían la calidad y estabilidad del suelo (Antezana, 2018), y agudizarían los procesos erosivos (Gayoso y Iroume, 1995).

F. Geomorfología

“La geomorfología es el estudio de las características físicas de la superficie terrestre de la Tierra, sus formas terrestres: ríos, colinas, llanuras, playas, dunas de arena y muchas otras. La geomorfología investiga los accidentes geográficos y los procesos que los modelan” (Huggett, 2011). Se ha hecho uso de la geomorfología para la contribución y evaluación de diversidad de peligros naturales, siendo las remociones en masa uno de ellos (Alcántara-Ayala, 2002). Generalmente, en una unidad geomorfológica van a ser varios los aspectos que ejercen un control

en la ocurrencia de los movimientos de tierra, haciendo que el estudio de las características geomorfológicas de un área de estudio sea importante en la comprensión y el potencial de las remociones en masa (Damayanti y otros, 2020). Alcántara-Ayala (2002) menciona que, para los análisis de vulnerabilidad de evaluación y gestión de riesgo, la geomorfología es un factor importante en la prevención de desastres naturales.

El uso de información de variables y unidades geomorfológicas en modelos estadísticos bivariados de mapas de susceptibilidad ha mejorado la precisión de identificación de zonas con mayores susceptibilidades de remociones en masa. Si bien cada área de estudio posee ciertas unidades y factores geomorfológicos característicos, una caracterización muy detallada de unidades geomorfológicas puede llevar a errores y limitantes de zonas de mayor susceptibilidad de remociones en masa (Van Westen y otros, 2003).

2.1.2.4. Factores desencadenantes

A. Precipitaciones

Uno de los factores que desencadenan a las remociones en masa son las precipitaciones, sobre todo en sectores que poseen elevados índices de lluvias estacionales (Sengupta y otros, 2010). De hecho, son las lluvias intensas en períodos de pocas horas, o aquellas lluvias moderadas con varios días de duración, aquellas que provocan la abundancia de remociones en masa (Wieczorek, 1996). El material contenido en las laderas alcanza una rápida saturación de agua al estar expuesto a precipitaciones elevadas, pudiendo ocasionar un aumento de la presión de agua en los poros del material (Çellek, 2020), alterando los estados tensionales por las presiones intersticiales, lo que provoca erosiones internas y externas del material, así como cambios mineralógicos que alteran las propiedades y resistencia del material (González de Vallejo y otros, 2002). Es, junto con la sismicidad, el factor desencadenante más estudiado, y considerado el desencadenante principal de las remociones en masa (Liu y otros, 2022; Zhang y otros, 2022). Los suelos más sueltos o débiles son los más sujetos a moverse producto de lluvias fuertes (Wieczorek, 1996).

También se ha estudiado la relación de la ocurrencia de remociones en masa, con el cambio de las propiedades de las precipitaciones producto del cambio climático (Wu y otros, 2016a), ejerciendo un aumento local de la intensidad de las lluvias, lo cual incrementaría la frecuencia de remociones en masa (Rotaru y otros, 2007).

B. Sismicidad

La acción sísmica, sobre todo al referirse a los terremotos, es una de las principales causas de las remociones en masa (Keefer, 1984; Cruden y Varnes, 1996; Strom, 2013), siendo las vibraciones provocadas por éstos las que ocasionarían tanto deslizamientos de tierra, desprendimientos de rocas, y otros tipos de remociones en masa (Prasad, 1995). La sismicidad afecta principalmente a la estabilidad de las laderas (Strom, 2013), y Prasad (1995) postula que, la aceleración del movimiento de suelo y la inclinación que posean las pendientes, transforma el sistema de fuerzas, avanzando las fuerzas impulsoras. Generalmente, los terremotos pueden desencadenar el movimiento de varios tipos de suelo, siendo los más susceptibles a la sismicidad aquellas rocas con cementación débil, erosionadas, cizalladas, e intensamente fracturas o muy unidas (Keefer, 1984). Las vibraciones por actividad sísmica de terremotos tectónicos, además de aumentar el esfuerzo de corte, reducirían la resistencia del material (Solle y Ahmad, 2016).

Los modelos predictivos buscan definir el peligro de los terremotos desde el punto de vista de la magnitud, las áreas afectadas, y el tiempo de recurrencia. Sin embargo, la precisión de dónde y cuándo se producen los terremotos no se pueden predecir (Guzzetti y otros, 1999). A su vez, las remociones en masa, que son provocadas por terremotos, no siempre ocurren en zonas en las que hayan ocurrido remociones en masa, o en zonas donde existen pendientes inestables en condiciones no sísmicas, por lo que la predicción de remociones inducidas por sismicidad requiere el análisis de los entornos geológicos particularmente susceptibles a los movimientos (Keefer, 1984). Como los terremotos son procesos que generalmente no ocurren con mucha frecuencia, hay que tener cuidado al suponer la acción sísmica a alguna remoción en masa, ya que, si ésta no resultase ser correcta, se sobreestimaría la acción sísmica, y subestimaría el peligro general de las remociones en masa, ya que otros factores y fenómenos más frecuentes pueden igualmente provocar la desestabilización de laderas (Strom, 2013).

Otra acción de los terremotos es el incremento en la elevación vertical, como también la inclinación del suelo, lo que ocasiona un aumento de las pendientes, provocando, eventualmente, procesos de remociones en masa (Cruden y Varnes, 1996).

C. Acción antrópica

Las remociones en masa son procesos naturales, pero la intervención humana en el terreno puede llegar a acelerar estos movimientos (Islam y otros, 2017). Algunas de estas acciones son, por ejemplo, la construcción de terraplenes artificiales como los de carreteras, excavaciones (Galli y Guzzetti, 2007), deforestación y excavación de laderas para la construcción de edificios y caminos (Islam y otros, 2017), tuberías rotas, rellenos artificiales no compactados, falta de confinamiento lateral, entre otras (Flores, 2010).

La intervención humana genera peligros al modificar las laderas, lo que las desestabiliza al cortarlas de forma demasiado empinada, si se colocan relleno de tierra sobre laderas inestables, si se redirige la esorrentía de lluvias, al agregar una fuente de agua de riego o séptica, y/o al eliminar la vegetación que sostiene la ladera (Olshansky, 1996 en Schuster y Highland, 2007). Así también, el factor antrópico es uno mitigable y que puede reducirse al mínimo (Malgot y Baliak, 2002), y algunas formas son, el evitar construir en terrenos propensos a remociones en masa, que la intervención antrópica que se haga no inestabilice las laderas, mitigación física para la protección de la población que pueda llegar a ser afectada, y la implementación de sistemas de monitoreo. Aun así, muchas veces las medidas de mitigación no son suficientes y no impide el avance de las remociones en masa cuando hay un aumento en todo el mundo de las presiones demográficas, las que incluso se acelerarán más en el futuro (Schuster y Highland, 2007).

D. Volcanismo

La consideración de la actividad volcánica como factor desencadenante de remociones en masa, ha sido ampliamente documentada (DeGraff y otros, 1989; Schuster y Highland, 2003; Solle y Ahmad, 2016; Svalova y otros, 2019). Por lo general, el impacto es debido a los movimientos sísmicos ocasionados por el volcanismo de una zona, reduciendo la resistencia del suelo y roca, y aumentando el esfuerzo de corte. Lo anterior, sumado a pendientes elevadas y las vibraciones de la actividad sísmica, hace a un sector vulnerable a las remociones en masa (Solle y Ahmad, 2016). Uno de los tipos de remociones en masa que puede ocasionarse en un volcán son los lahares, un tipo de flujo de detritos, pero de escombros volcánicos, movilizándolo tefra acumulada en la ladera de los volcanes (Cruden y Varnes, 1996).

También se pueden alterar las tensiones locales de una pendiente por terremotos volcánicos, y de la misma manera por explosiones de erupciones volcánicas. La inclinación de suelo por elevación

vertical, además de la sobrecarga de material en una pendiente, son otros procesos que se lograrían por acción volcánica (Cruden y Varnes, 1996).

2.2. Síntesis geológica y geomorfológica para el AMC

2.2.1. Litología

En el área de estudio, existe una variedad de formaciones geológicas, habiendo tanto rocas intrusivas, sedimentarias y metamórficas. Sin embargo, solamente hay un ejemplar de roca intrusiva (Batolito Costero del Sur) y metamórfica (Serie Oriental), habiendo mayor cantidad de formaciones sedimentarias. La formación más grande es la correspondiente al Batolito Costero del Sur, específicamente a la subunidad Granitoides de Concepción, que está presente en las tres comunas estudiadas. Al comparar los mapas usados para la creación del mapa litológico, el que se mostrará más adelante (ver sección 4.1.5), los sectores poblados y depósitos de ríos fueron categorizados de distintas maneras por las fuentes bibliográficas usadas en la creación del mapa litológico, pero para los usos de este trabajo, se categorizó el conjunto de estos dos elementos como “Depósitos cuaternarios”.

2.2.1.1. Rocas metamórficas

A. Serie Oriental

La Serie Oriental es una de las dos divisiones del Basamento Metamórfico, división propuesta por Aguirre y otros (1972), siendo esta serie la zona de presión intermedia a baja, teniendo una baja razón P/T. Esta serie se emplaza en el área de estudio con tendencia NNW-SSE entre el sector de La Leonera en Chiguayante y el comienzo de la comuna de Hualqui por la ruta O-60, además de en la propia comuna de Hualqui, cerca del sector de Quilacoya. La otra división del Basamento Metamórfico, la Serie Occidental, no se encuentra dentro del área de estudio.

Hervé (1977) distingue zonas de biotita, andalucita y sillimanita en la Serie Oriental, las que son generadas por la relación de contacto con el Batolito Costero del Sur, que se encuentra intruyendo a la Serie Oriental, aumentando el grado metamórfico hacia el contacto con la unidad ígnea (Creixell, 2001).

Edades iniciales consideraban la edad de la totalidad del Basamento Metamórfico, el cual poseía un rango entre 273 y 342 Ma mediante determinaciones de edad Rb/Sr de rocas enteras del

basamento (Munizaga y otros, 1973). Más recientemente, Willner y otros (2005) utilizan edades $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ en muscovitas extraídas de vetas de cuarzo y concentraciones de mica blanca, las que arrojan un rango de edad entre 296 ± 2 y 301 ± 1 Ma.

2.2.1.2. Rocas ígneas

A. Batolito Costero del Sur

La única formación ígnea que alberga la zona de estudio es el Batolito Costero del Sur (Hervé y otros, 1987), unidad con tendencia NNE con emplazamiento desde la latitud $32^{\circ}30'S$ (Hervé y otros, 1987) hasta los $38^{\circ}S$, la cual intruye a la Serie Oriental del Basamento Metamórfico (Creixell, 2001), e infrayace en inconformidad a las formaciones Santa Juana, Quiriquina y Curanilahue (Cucurella, 1978 en Creixell, 2001). Creixell (2001) divide a esta formación en las subunidades Granitoides de Nahuelbuta, Tonalitas de Santa Juana, y Granitoides de Concepción, siendo esta última la única presente en el área de estudio, estando las otras emplazadas hacia el sur del río Biobío.

Dentro de la litología de los Granitoides de Concepción, predominan los monzogranitos de biotita, aunque también hay presencia de tonalitas de biotita y mica blanca, y rocas hipabisales tonalíticas (Creixell, 2001). En terreno se observó que la mayor parte de la subunidad está alterada a arcillas amarillentas, debido principalmente a las condiciones climáticas del área de estudio. Cuando se observó la roca fresca, ésta tenía colores grisáceos, lo que coincide con lo observado por Creixell (2001). Sumado a lo anterior, Crisóstomo (2017) menciona la distinción en los Granitoides de Concepción de los cuerpos pegmatíticos Poñen, Coyanmahuida y Vertientes, cada uno nombrado por su localidad.

Deckart y otros (2014) detallan una edad del Batolito Costero del Sur entre los 300 y 320 Ma, específicamente al período Pensilvaniano (Carbonífero Superior), mediante dataciones de circones por la técnica analítica U-Pb SHRIMP en rocas cuarzodioríticas a graníticas, atribuyendo este período de tiempo, 20 Ma, a posibles cambios en los parámetros de subducción.

2.2.1.3. Rocas sedimentarias

A. Formación Santa Juana

Ferraris (1981) introduce el nombre de esta formación para identificar a las rocas sedimentarias del Triásico Superior, cercanas a la localidad de Santa Juana, a lo largo del río Biobío. En el área de estudio se encuentra en la comuna de Hualqui, desde el sector de Las Higueras hacia el sur, estando presente cerca de las localidades de Mareuche, Unihue, Talcamávida, Pangué, Gomero y Mardonal, con una tendencia NW-SE. Sobreyace en inconformidad al Batolito Costero del Sur (Cucurella, 1978 en Creixell, 2001).

Tavera (1960) menciona que, la constitución litológica de la Formación Santa Juana es de pizarras, grauvacas, arcosas y conglomerados. A su vez, mediante un perfil entre las localidades de Quilacoya y Talcamávida, evidencia tres miembros de la formación, siendo éstos el Miembro Quilacoya, con niveles inferiores de arcosas y conglomerados, y superiores de areniscas, pizarras y carbón; el otro es el Miembro Unihue, que posee arcillas, alteraciones de bancos de areniscas de grano fino a medio; y el Miembro Talcamávida-Gomero, con arcillas arenosas y capas delgadas de areniscas finas con restos vegetales.

La edad más detallada de la Formación Santa Juana ha sido datada por medio de restos vegetales. Más recientemente, Nielsen (2005) atribuye una edad del Carniano, por medio de estudios en restos de plantas. A su vez, Leppe y otros (2006) sitúan a la Formación Santa Juana, a la que ellos denominan el “Triásico del Biobío”, entre las edades del Carniano medio y el Noriano superior, resultado de estudios de restos fósiles de la clase Filicopsida.

B. Formación Quiriquina

Darwin (1846) hace una primera descripción de las areniscas de la isla Quiriquina. Galli (1967) propone por primera vez el nombre de Formación Quiriquina para ajustarse a las normas de nomenclatura estratigráfica en esos años. Finalmente, Biró (1982) define a la Formación Quiriquina de manera formal, para identificar a las rocas del Cretácico Superior en la región del Biobío, debido a que años antes habían sido nombradas de diferentes formas por otros autores. La Formación Quiriquina es de tipo marino-litoral y fosilífera (Frutos y otros, 1982), y aflora mayormente en las playas de las comunas de Penco y Tomé, además de ciertas zonas en las comunas de Talcahuano, Concepción, y en menor medida en Curanilahue en la provincia de Arauco (Biró, 1982). En el área de estudio, aflora exclusivamente en la comuna de Concepción, específicamente en el cerro La Pólvora, cerro Chacabuco, cerro Amarillo, cerro Chepe y cerro Lo Galindo (Geología de Campo II, 2021).

En el área de estudio, la Formación Quiriquina sobreyace en inconformidad los Granitoides de Concepción (Salazar, 2004; Buatois y Encinas, 2011), e infrayace en paraconformidad la Formación Curanilahue (Buatois y Encinas, 2011) y los depósitos cuaternarios (Salazar, 2004).

Dentro de su contenido litológico, Salazar (2004) separa a esta formación en cuatro secciones, siendo, de base a techo, el conglomerado basal, las areniscas amarillas, el nivel de coquina, y la zona de areniscas con concreciones calcáreas.

La edad de la Formación Quiriquina se ha determinado por su contenido fósil. Biró (1982) realiza una datación de diez fósiles de ammonites de la formación, estableciendo su edad entre el Campaniano y Maastrichtiano, al igual que Galli (1967). Salazar (2004) restringe la edad al Maastrichtiano, argumentando edades estimadas de diversas Biozonas, estimando una edad desde la zona superior del Maastrichtiano inferior y/o la zona inferior del Maastrichtiano superior hasta la zona superior del Maastrichtiano superior.

C. Formación Curanilahue

Definida formalmente por Muñoz Cristi (1956 en Pineda, 1983), esta formación es de tipo continental-marino, al poseer dos sub-divisiones continentales y una marina, siendo estas, de base a techo, los miembros Lota (continental), Intercalación (marina), y Colico (continental) (Muñoz Cristi, 1956 en Pineda, 1983).

En general, las rocas de esta formación son principalmente areniscas en parte conglomerádicas, además de arcillas con asociación de mantos carboníferos, en donde se intercalan areniscas verdes fosilíferas (Pineda, 1983). En el área de estudio, se encuentra en cerro Chepe, cerro Amarillo, cerca de cerro Lo Galindo, y cerro Chacabuco. Esta unidad sobreyace en concordancia la Formación Quiriquina (Pineda, 1983) e infrayace en discordancia angular la Formación Andalién (Geología de Campo II, 2021).

La edad de esta formación, por el contenido fósil del Miembro Intercalación, se ha determinado que corresponde al Eoceno Inferior (Tavera, 1942 en Pineda, 1983).

D. Formación Andalién

Esta formación, definida por primera vez por Galli (1967), es una agrupación de rocas en las que el área tipo se localiza en las serranías bajas distribuidas entre el cerro Verde, ubicado al oeste de

Concepción, y la ciudad de Penco. En el área de estudio, la Formación Andalién está presente en los sectores de las lomas de San Andrés, San Sebastián y Bellavista en la comuna de Concepción, aflorando con tendencia ENE-WSW (Geología de Campo II, 2021). La formación sobryace la Formación Cosmito en discordancia angular (García, 2004), e infrayace, de la misma manera, la Formación Huachipato (Galli, 1967).

Litológicamente, esta formación contiene areniscas y conglomerados orogénicos muy descompuestos, teniendo el conglomerado una matriz arenítica mediana a gruesa. Poseen fenoclastos, en su mayoría subredondeados de filita, micacita, metacuarcita, silicita y rocas graníticas (Galli, 1967).

Galli (1967) compara las relaciones de la Formación Andalién con otras formaciones geológicas para asignar una edad tentativa del Plioceno al Pleistoceno, esto debido a la nula presencia de fósiles. Brüggén (1950 en Galli, 1967) estima una edad del Plioceno al correlacionar rocas de la península de Arauco de esa época, con la Formación Andalién. García (2004) presenta una actualización de la edad de esta formación al comparar las relaciones de contacto de esta unidad con las formaciones Cosmito y Huachipato, asignando para la Formación Andalién una edad del Oligoceno-Mioceno.

E. Formación Huachipato

Fue definida por primera vez por Galli (1967), consistiendo en sedimentos de arenas arcósicas y líticas de moderada a buena selección, que afloran entre la bahía de Concepción, la bahía de San Vicente, el río Biobío, y las escarpas de la Cordillera de la Costa y la península de Tumbes. En el área de estudio, según el mapa geológico de Geología de Campo II (2021), aflora con tendencia NE-SW en los sectores de Lomas de San Andrés y Lomas de San Sebastián, siendo sedimentos de arenas semiconsolidadas de grano fino a medio, de colores gris a negro, y con presencia de líticas de origen volcánico. Esta formación yace en discordancia angular sobre el Batolito Costero del Sur, y las formaciones Quiriquina, Cosmito y Andalién (Galli, 1967).

La edad de esta formación es Pleistoceno superior hasta el reciente, debido al reconocimiento de biofacies superpuestas de foraminíferos, las que poseen un desarrollo máximo entre 11.500 y 1.500 años (Martínez Pardo, comunicación escrita en Galli, 1967).

2.2.2. Geología estructural

La única estructura principal cercana al área de estudio es la zona de “Lineamientos Bío-Bío”, la cual se ha interpretado como una zona de debilidad con tectónica preandina (Echtler y otros, 2003 en Moreno, 2004), posee rumbo NW-SE, se extiende desde la Península de Tumbes hasta el Valle Central, y es la unidad estructural responsable del cauce principal NW-SE del río Biobío en la costa (Moreno, 2004). Posiblemente, esta estructura sea una zona de falla con desarrollo en el basamento, debido a la acción de la tectónica extensional del Triásico sobre ella, produciendo debilidades corticales mayores producto de las posteriores reactivaciones (Echtler y otros, 2003 en Moreno, 2004).

En principio, se asociaban numerosas fallas, de dirección norte, presentes en los cerros de Concepción, aunque la falta de información solo podía suponer las que limitaban por el este a los bloques tectónicos de los cerros Amarillo-La Pólvora, y Chepe-Chacabuco (Galli y Lemke, 1963). Posteriormente, Galli (1967) inferiría las fallas Caracol, Lo Pequén, La Pólvora, Chepe y Chacabuco en la ciudad de Concepción, con rumbos entre 25°E y 70°E aproximadamente, no pudiendo ser comprobadas por observación directa, limitando cada una a su respectivo cerro. En general, la inferencia de fallas en la ciudad de Concepción es por las relaciones estratigráficas y geométricas de las unidades geológicas y modelos geofísicos, además de la disposición topográfica de los cerros isla (Vivallos y otros, 2010), muchas de estas fallas o fracturas siendo el resultado de las dislocaciones del terreno posterior a la formación de las rocas sedimentarias (Naranjo y otros, 2005). La falla Caracol ocasiona un escarpe en el cerro del mismo nombre (Naranjo y otros, 2005), además de que ésta falla, junto con la falla San Vicente ubicada al sur de la Península de Tumbes, son las dos fallas que configuran la llanura de Concepción-Talcahuano, y entre medio de éstas, se originan fallas menores, sub-paralelas, y con rumbo NNE, las cuales explicarían la presencia de los cerros isla en la llanura de Concepción, siendo los cerros Chacabuco, Chepe, La Pólvora y Lo Galindo (Naranjo y otros, 2005).

2.2.3. Geomorfología y clima

2.2.3.1. Geomorfología regional

El área de estudio, según las denominaciones que hace Börgel (1983), contendría a una pequeña parte de la planicie marina y/o fluvio-marina, a los llanos de sedimentación fluvial y/o aluvional, y a la Cordillera de la Costa (Figura 2.8).

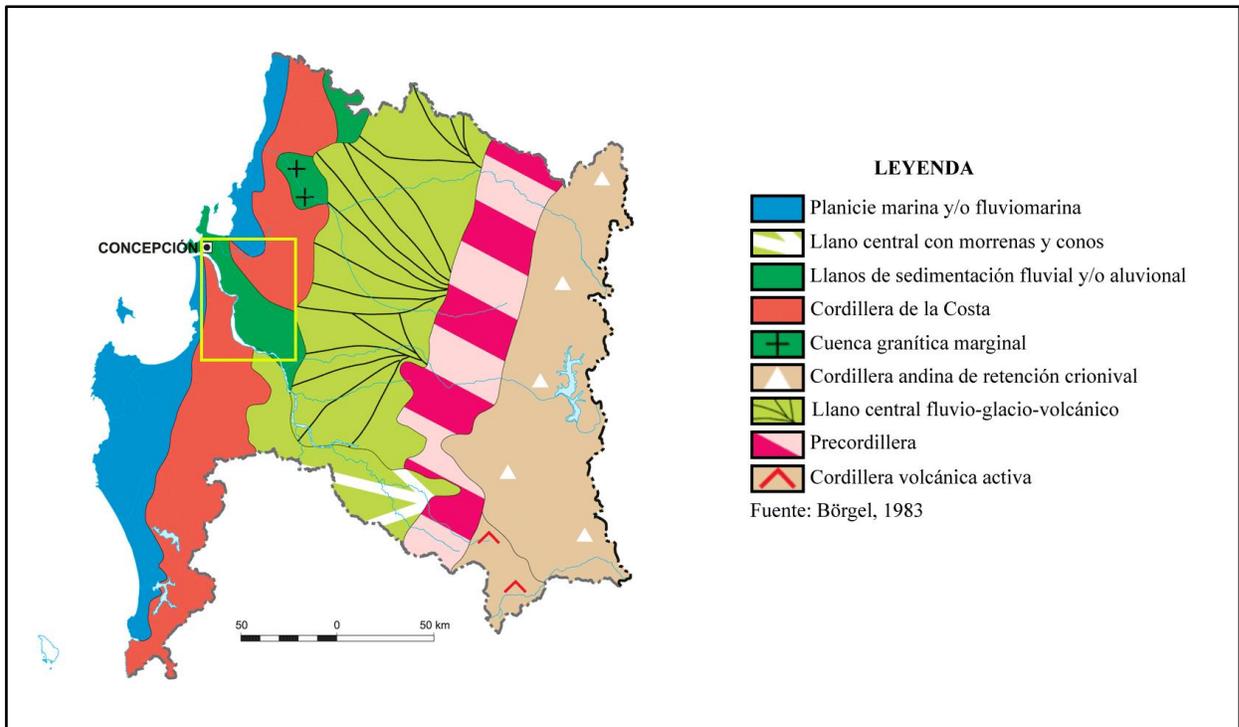


Figura 2.8: Geomorfología de la región del Biobío. Tomado y modificado del Instituto Geográfico Militar, en base a las fuentes de Börgel (1983).

El área de estudio está dentro de la “Región Central de las Cuencas y del Llano Fluvio-Glacio-Volcánico”, agrupación regional cuyos límites son: al norte el río Aconcagua, al sur parcialmente el río Biobío, al este el límite fronterizo con Argentina, y al oeste el litoral del Pacífico (Börgel, 1983). Dentro de la región del Biobío, las unidades morfológicas presentes son:

A. Planicies litorales:

Es el primer rasgo observado de oeste a este, el cual se encuentra entre el mar y la cordillera de la Costa, y la extensión de norte a sur es entre el límite norte del país, y el canal de Chacao en el sur. Esta unidad es producto, en parte, de los movimientos de ascenso y descenso de los bloques costeros que tuvieron lugar en el litoral entre la etapa inicial del Cretácico y el Cuaternario. Generalmente, el aspecto que posee es de una terraza, aunque los escalones y el ancho va a variar dependiendo del sector (Errázuriz y otros, 1998).

En el AMC, específicamente en la desembocadura del río Biobío, existe un desarrollo de la costa acantilada, con episodios de playas y barras arenosas cerca de algunas desembocaduras (Börgel, 1983).

B. Cordillera de la Costa

Ubicada frente al litoral, y originada por los movimientos tectónicos del ciclo andino iniciados en el Cretácico medio, y que continúan en el Cuaternario. Posee una extensión de 3.000 km de largo, y un rango en el ancho entre 30 y 50 km. El límite norte es el cerro Camaraca, a 20 km al sur de Arica, y su límite sur es el cerro Tres Montes en la península de Taitao en la región de Aysén. Esta unidad es heterogénea por la contribución de varios elementos originados en el transcurso de los tiempos geológicos hasta la actualidad, y posee un menor tamaño al compararla con la cordillera de los Andes, debido a que los movimientos verticales que originaron a la primera no fueron tan fuertes como en la segunda (Errázuriz y otros, 1998).

Más al sur del río Itata, la cordillera de la Costa está presente con valores vecinos de 650 m, enmarcando el valle del río Andalién; y antes de llegar a la orilla norte del río Biobío, adquiere un valor de colinas moderado con poca trascendencia en el relieve local (Börgel, 1983), muy ligado a frecuentes cortes en esta cordillera, debido al flujo de los valles de los ríos procedentes de la cordillera de los Andes (Errázuriz y otros, 1998).

C. Depresión intermedia

Comprendida entre la cordillera de la Costa y la de los Andes, se encuentra presente entre el límite norte del país y Puerto Montt, aunque de manera interrumpida por acciones estructurales y morfoclimáticas, formándose en el Cenozoico a la vez que se levantaban las cordilleras de la Costa y los Andes. El descenso de esta unidad es de cientos de metros, siendo rellenado por materiales de la cordillera andina por agentes como los ríos, hielo, viento, entre otros. Lo anterior se evidencia por la presencia de morfologías como morrenas, planicies aluviales, dunas, lahares, entre otras (Errázuriz y otros, 1998).

La región del Biobío se encuentra dentro del “llano central fluvio-glacio-volcánico”, un sector de la Depresión intermedia con condiciones y características de suelo variables, producto de la proporción de los materiales de sedimentación fluvio-glacio-volcánica que se depositan (Börgel, 1983).

D. Precordillera

También llamada “La Montaña”, es una unidad de origen sedimentario. Su orografía mayor en el norte es el Volcán Tacora, por lo que tiene presencia desde el límite norte del país, y su límite sur

es el río Allipén (oeste del volcán Llaima). Está formada por la desordenada acumulación de materiales glaciares, volcánicos y fluviales, y sus características topográficas son: laderas abruptas, ríos encajonados, materiales fuertemente arcillosos y otros permeables, materiales constituidos por rodados podridos y multicolor, además de vegetación mesomórfica densa. Estas características la convierten en una unidad de difícil penetración, además, ningún otro rasgo geomorfológico es común a cualquier ámbito precordillerano (Börgel, 1983).

E. Cordillera de los Andes

Es el principal rasgo orográfico del país, por su altitud y desarrollo. Es heterogénea tanto en los materiales que la forman, como en sus rasgos morfológicos y aspecto general. Su extensión de norte a sur es, entre el límite norte del país, y Tierra del Fuego, siendo una “muralla compacta de gran elevación, árida y volcánica” en el sector norte (entre los 17°30' y 27°00'S), con cerros que superan los 6.000 m, observándose en el sector central (entre los 27° y 41°S) una disminución de la elevación con cerros de menos de 4.000 m de altura, y ya en el sector sur (entre los 41° y 56°S), producto de la fuerte acción glacial, penetración del mar, amplitud de glaciares y grandes ríos, convierten a este sector de la cordillera de los Andes en el más accidentado, difícil y hostil (Errázuriz y otros, 1998).

La región comprende parte del sector central de la cordillera de los Andes, estando dominada tanto por la acción volcánica, como por un clima mucho más húmedo que en el sector norte (Errázuriz y otros, 1998), teniendo relieves más desordenados con serie de pequeñas cordilleras transversales y en forma de arco (Börgel, 1983).

2.2.3.2. Geomorfología local

En las ciudades de Concepción y Talcahuano está presente una llanura arenosa de arenas basálticas procedentes del volcán Antuco, la cual se encuentra enmarcada por escarpes de falla que limitan la cordillera de la Costa (Flores, 2010). Es al interior de esta llanura que, en la ciudad de Concepción, debido al constante depósito de arenas y material fino del río Biobío (Falcón y otros, 2010a), se formaron cerros isla con un rango de edades entre el período Cretácico y la etapa inicial de la era del Cenozoico, siendo conformados por rocas de tipo sedimentario (lutitas, areniscas, conglomerados, entre otras), y presentando fallas y basculamientos por tectónica (Flores, 2010). Muchas de estas unidades, en Concepción, se aprecian de mejor manera en la figura 2.9.

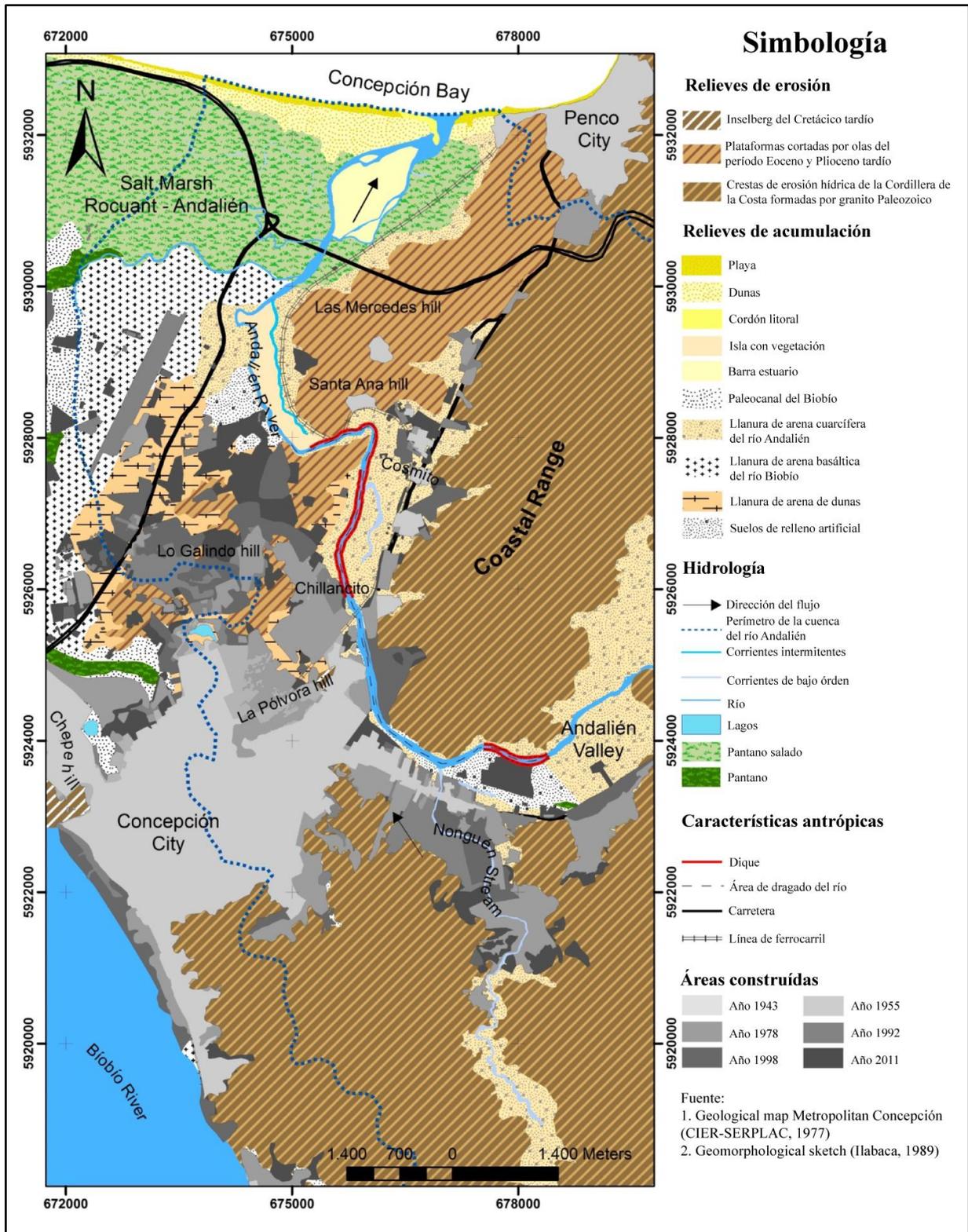


Figura 2.9: Mapa geomorfológico de parte de la comuna de Concepción. Modificado de Rojas y otros (2017).

Los cerros isla en la ciudad de Concepción son los cerros Chacabuco, Chepe, La Pólvora y Lo Galindo. Además, tanto en las comunas de Concepción y Chiguayante está presente el cerro Caracol, unidad dominada por el Batolito Costero del Sur, altamente alterado por la acción climática del sector.

El área de estudio está comprendida entre las Planicies litorales y la cordillera de la Costa, específicamente estando Concepción entre estas dos unidades (Falcón y otros, 2010a), siendo el límite los faldeos de la cordillera de la Costa correspondientes al cerro Caracol (Poblete, 1967). La cordillera de la Costa va a restringir el crecimiento de las ciudades hacia el este, además de conformar lomas, colinas y cuencas de poco tamaño y alturas menores a 400 msnm (Falcón y otros, 2010a). Estos sectores serían los correspondientes a las comunas de Chiguayante y Hualqui, los cuales poseían mayor influencia de los cerros, y las unidades morfológicas que podían verse en terreno, generalmente estaban asociadas al drenaje de la zona.

2.2.3.3. Drenaje

Los datos de redes hídricas adquiridos desde el MINVU (2013), para este trabajo, logran evidenciar una alta frecuencia de redes de drenaje de tipo dendríticas en el AMC, estando éstas mayormente presentes en los sectores ajenos a las ciudades y poblados del área de estudio. La presencia de pequeñas redes de drenaje, en sectores con mayores pendientes, tendría su origen en la alimentación producida por las lluvias en la región, estando algunas inactivas en periodos de verano, pero reactivándose al haber precipitaciones. En el área de estudio, se destaca la presencia de dos unidades fluviales mayores en la zona:

A. Río Andalién

Este río se origina por la unión de los esteros Poñen y Curapalihue, y cubre 780 km² con un curso de 36 km de longitud, emplazándose sobre la unidad de Planicies litorales, y también por un sector más reducido de la Cordillera de la Costa (DGA, 2004a). Este río se pudo visualizar en terreno al lado de la carretera a la altura de la villa Juan Riquelme, y que luego sigue en dirección NW, pasando cerca de Palomares, en Collao, Andalién, Tucapel, sector Lomas de Bellavista y Lomas de San Sebastián, hasta desembocar en la Bahía de Concepción por detrás del Aeropuerto Carriel Sur, al lado de la Ruta a Cosmito.

B. Río Biobío

El río Biobío es uno de los que posee la cuenca de mayor superficie y caudal en el país, con una superficie de 24.264 km² y caudal de 380 km, estando presente en las regiones de Ñuble y del Biobío, abarcando también una parte de la región de la Araucanía. Se origina en la Cordillera de los Andes, específicamente en la ribera oriental de la laguna Galletué y también con aportes de la laguna Icalma, en la región de la Araucanía, desarrollando un curso de agua con meandros, siendo alimentado por varios ríos pequeños y otros más grandes, como los ríos Lonquimay, Rehue, y Laja, siendo este último el afluente de la región del Biobío más importante que posee el río Biobío (DGA, 2004b). El río se vislumbra por toda el área de estudio al oeste en los sectores de la costanera, y finalmente, va a desembocar en la comuna de Hualpén, en la Desembocadura del río Biobío.

2.2.3.4. Clima

Según los datos tomados de la Dirección Meteorológica de Chile desde la estación meteorológica del aeropuerto Carriel Sur (Tabla 2.2), ubicado en el límite entre las comunas de Concepción y Talcahuano, las mayores temperaturas se presentan en los meses de verano, siendo enero el mes con el promedio más alto desde 1993 al 2022 con 22,8 °C. A su vez, los meses de invierno son los más fríos, alcanzando la temperatura media más baja el mes de julio con 9,2 °C, y la mínima en agosto con 5,7 °C. Los datos de la tabla 2.2 fueron calculados a mano, con las temperaturas de los meses de todos los años disponibles, usando, tanto para la temperatura máxima, como mínima, el valor medio, y no la temperatura absoluta de cada una. Se aprecia en la figura 2.10 que, durante los últimos 30 años, se ha mantenido un promedio estable que no ha tenido mayores perturbaciones para cada estación del año.

Tabla 2.2: Temperaturas máximas, media, mínimas, y milímetros de precipitaciones en Concepción. Elaboración propia en base a datos tomados de la Dirección Meteorológica de Chile en la estación Carriel Sur.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
T° med. (°C)	16,8	16,3	15	12,9	11,3	9,8	9,2	9,7	10,6	12	14	15,8
T° min. (°C)	10,9	10,7	9,5	8	7,6	6,5	5,7	5,9	6,1	7,2	8,7	10,2
T° máx. (°C)	22,8	22,4	21	18,3	15,6	13,6	13,2	13,9	15,4	17	19,3	21,4
Lluvia (mm)	15	14	23	66	174	229	198	144	81	60	32	23

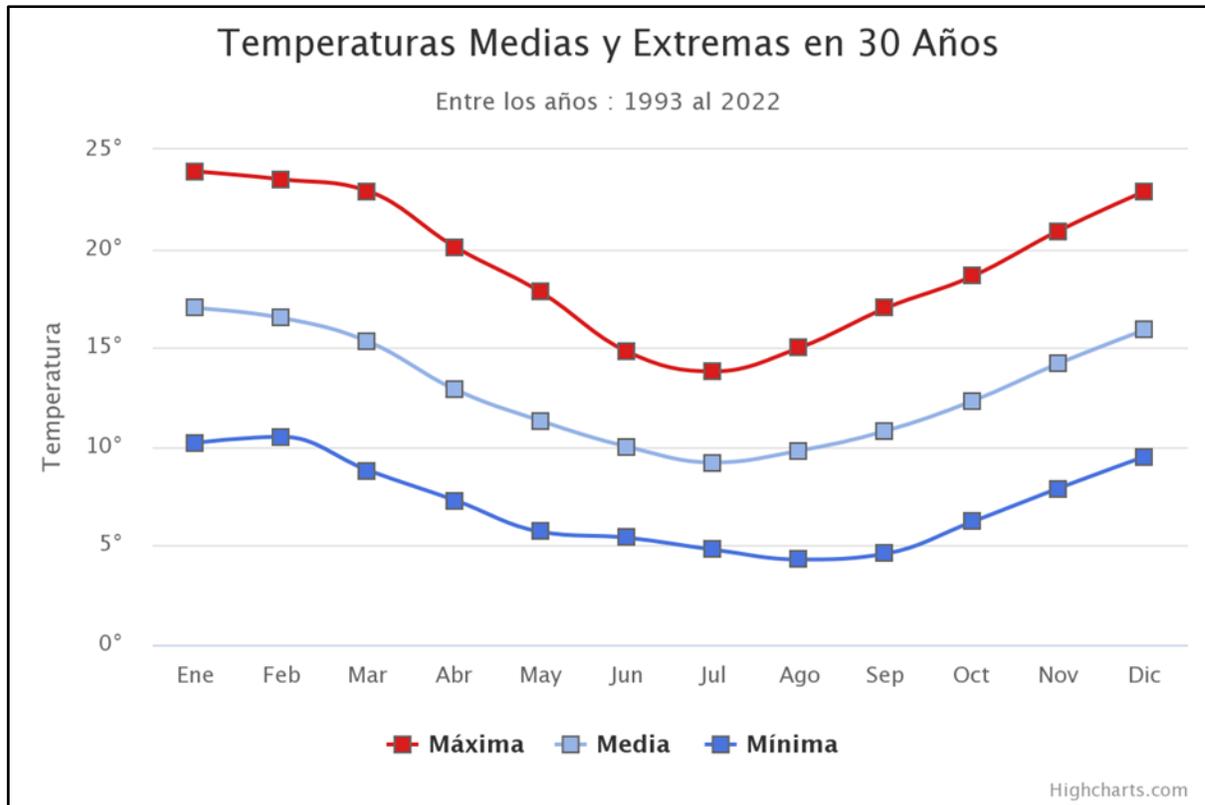


Figura 2.10: Gráfico de líneas que muestran las variaciones de temperatura máxima, media y mínima en Concepción. Obtenido de la Dirección Meteorológica de Chile en la estación Carriel Sur.

La estación del aeropuerto Carriel Sur también presenta índices de precipitaciones desde el año 1966 hasta la fecha, teniendo 984,3 mm de precipitaciones como promedio en un año normal. Hasta el año 2008, la mayoría de los años alcanzaban precipitaciones mayores al promedio normal. Desde 2008, las precipitaciones han ido en descenso, estando bajo el promedio normal, siendo 2021 el año más seco de todos con 559,2 mm de precipitaciones.

El factor de las lluvias ha sido estudiado en la ciudad de Concepción, ya que ha sido desencadenante de episodios muy fuertes de remociones en masa, estudiándose de la misma manera para la ciudad de Chiguayante (Naranjo y otros, 2006a; Naranjo y otros, 2006b). Se visualiza en la figura 2.11 cómo las precipitaciones registradas son muy bajas en los meses de verano, para después aumentar progresivamente y alcanzar sus niveles máximos entre el otoño y el invierno, y finalmente volver a descender en primavera.

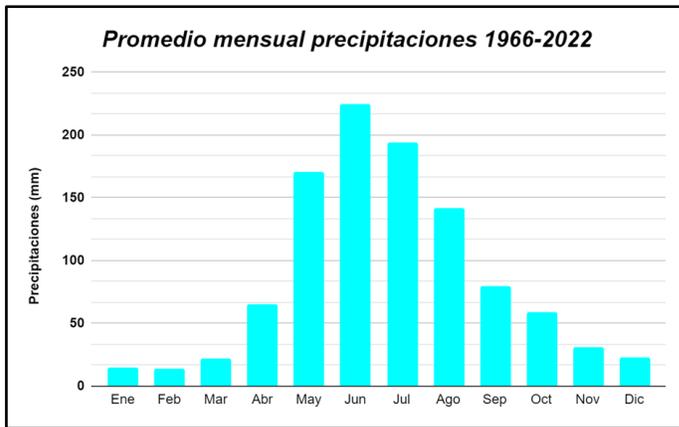


Figura 2.11: Promedio mensual de precipitaciones en Concepción de 1966 hasta 2022. Elaboración propia en base a datos obtenidos de la Dirección Meteorológica de Chile en la estación Carriel Sur.

El clima en las otras comunas del área de estudio es similar. Chiguayante presenta un microclima de características óptimas para la vida humana, esto influenciado por la presencia del río Biobío y la Cordillera de la Costa (SECPLAN, 2023). Según la clasificación de Köppen-Geiger (1936), Chiguayante se clasifica como Csb (clima mediterráneo con influencia oceánica). Datos extraídos desde Climate Data (Tabla 2.3) evidencian que el mes más cálido es enero, con una temperatura promedio de 18,7°C pudiendo alcanzar la máxima de 24,6°, y el mes más frío es junio, con un promedio de 8,3°C consiguiendo llegar a una mínima de 5,1°. Chiguayante presenta precipitaciones, con una caída de lluvia anual de 1053 mm, siendo junio el mes más lluvioso con 227 mm de precipitaciones, y enero el menos lluvioso con 8 mm de precipitaciones.

Tabla 2.3: Temperaturas máximas, media, mínimas, y milímetros de precipitaciones en Chiguayante. Elaboración propia en base a datos tomados de la página Climate Data.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
T° med. (°C)	18,7	18,3	16,5	13,3	10,8	9,2	8,3	8,9	10,1	11,9	14,5	16,9
T° min. (°C)	13,3	13,3	11,6	9,1	7,6	6,3	5,1	5,5	6	7,6	9,6	11,7
T° máx. (°C)	24,6	24	22,2	18,4	14,9	12,8	12,1	13	14,8	16,8	19,7	22,4
Lluvia (mm)	8	14	26	64	174	227	176	159	89	62	31	23

La comuna de Hualqui también presenta un microclima propio (MINVU, 2016), el cual, según datos recopilados por Climate Data (Tabla 2.4), entra en la clasificación de Köppen-Geiger (1936) como Csb (clima mediterráneo con influencia oceánica), la misma que tiene la comuna de Chiguayante. En esta comuna, las temperaturas suelen acentuarse un poco más, siendo los inviernos más fríos y los veranos más calurosos que el resto de la Provincia de Concepción. El mes más

cálido es enero, con una temperatura promedio de 19,5°C, pudiendo alcanzar una máxima de 26°C; y el mes más frío es julio con una temperatura media de 7,9°C, pudiendo alcanzar una mínima de 4,5°C. Las precipitaciones son prácticamente iguales a las que presenta la comuna de Chiguayante, cayendo 1053 mm de agua al año, julio siendo el mes más lluvioso con 227 mm de precipitaciones, y enero en el que menos precipita con 8 mm.

Tabla 2.4: Temperaturas máximas, media, mínimas, y milímetros de precipitaciones en Hualqui.
Elaboración propia en base a datos tomados de la página Climate Data.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
T° med. (°C)	19,5	18,9	16,8	13,3	10,6	8,8	7,9	8,6	9,9	12	14,8	17,5
T° min. (°C)	13,5	13,4	11,6	8,9	7,2	5,8	4,5	5	5,5	7,2	9,3	11,7
T° máx. (°C)	26	25,3	23,1	18,9	15	12,7	12,1	13	15,1	17,3	20,5	23,6
Lluvia (mm)	8	14	26	64	174	227	176	159	89	62	31	23

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Compilación de información para base de datos

3.1.1. Inventario de puntos de RM

El estudio de la relación de los factores condicionantes de las remociones en masa, y la distribución de éstas, es importante. Por lo que, el inventario de remociones en masa es un material vital y básico para el posterior mapeo de la susceptibilidad de remociones en masa (Du y otros, 2017), siendo el principal dato de entrada, el cual puede ser preparado usando técnicas de teledetección, como también con estudios hechos en campo, o ambos (Shano y otros, 2021).

Para este trabajo, se usaron las dos técnicas anteriormente mencionadas. Se dispuso de los puntos de remociones en masa de las comunas de Concepción, Chiguayante y Hualqui que fueron datados entre enero y febrero de 2023 por las prácticas del “Grupo de estudio Multiamenazas Biobío”. Primero, estos puntos fueron registrados por bibliografía, entre ellas el trabajo de Gajardo (2022), también fueron registrados sectores donde hubo remociones en masa documentados en material de prensa, además del registro por medio de imágenes satelitales de Google Earth Pro. Posteriormente, algunos de estos puntos, los que no estaban restringidos por permisos legales o no presentaban un riesgo para el equipo, fueron visitados en terreno junto a los alumnos practicantes, para visualizar si los escarpes de remociones en masa estaban presentes, o si había algún vestigio del movimiento de masa, registrando los puntos finales que conforman el inventario inicial entregado. El trabajo en terreno, hecho por los practicantes, fue por todas las comunas del AMC, siendo nuestra campaña de terreno los días que contemplaban las tres comunas de interés en este estudio, los días 13 de enero, y 2, 16 y 17 de febrero del presente año.

El inventario, posteriormente, fue filtrado en ArcMap 10.5, debido a los siguientes motivos:

- Se usaron los bloques satelitales del MINVU (2013) para observar el área de estudio. Sin embargo, al adjuntar el inventario, algunos puntos se movían del centroide de los escarpes de las remociones en masa, por lo que tuvieron que moverse manualmente a su posición correcta.
- Había sectores en específico, en el que fueron registradas muchas remociones en masa, lo que ocasionaba una saturación de puntos que podrían sobreestimar las características de ese sector. En este caso, algunos puntos fueron borrados.

- Existían puntos, sobre todo de registro bibliográfico, muy antiguos. Al haber un crecimiento demográfico en las ciudades, el cual modifica, de forma antrópica, ciertos terrenos, al observar esos puntos con imágenes satelitales más recientes, muchas veces solo estaban rodeados de casas, edificios o cemento, no encontrando características morfológicas propias que originen una remoción en masa, por lo que fueron eliminados. Esto se pudo realizar por el hecho de que, una cantidad grande de remociones en masa en el área de estudio, son deslizamientos de tierra relativamente pequeños.

Para ampliar el inventario de remociones en masa, se hizo un trabajo posterior de toma de datos mediante imágenes satelitales de Google Earth Pro, para el que se sobrepuso el inventario de puntos corregido, con el fin de no registrar los mismos puntos. El registro de los puntos por imágenes satelitales fue realizando una visualización de sectores con escarpes observables, además de laderas deslizadas, pudiendo ver y registrar su evolución por medio de la herramienta “Tiempo”, permitiendo el acceso a las imágenes satelitales históricas de años anteriores. Algunos de estos puntos fueron ligeramente corregidos en ArcMap 10.5, ya que, al aplicar la conversión de Google Earth Pro a ArcMap del *shapefile* de puntos, algunos se movían del sector de su escarpe, usando como imagen de referencia los bloques regionales del MINVU (2013).

Finalmente, el inventario final de puntos de remociones en masa fue digitado en Microsoft Excel, dando un formato general para los puntos entregados y filtrados (Anexo I), como también para los puntos propios, los que igualmente tuvieron un proceso de filtro para visualizar y corregir errores (Anexo II).

3.1.2. Material topográfico digital

Para el presente trabajo, se requiere un Modelo de Elevación Digital (DEM por sus siglas en inglés) del área de estudio, que es una representación 3D del terreno, y su uso permite la obtención de derivados geomorfológicos para el posterior estudio de susceptibilidad de remociones en masa (Acharya y Lee, 2019). Con el uso del DEM, se permitirá tanto la obtención directa de los parámetros condicionantes morfométricos (grado de pendiente, orientación de pendiente, elevación y curvatura) mediante el procesamiento en el programa ArcMap 10.5, como también imágenes *hillshade* para el trazo manual de lineamientos estructurales.

La resolución de los DEM en los trabajos que involucran remociones en masa va a depender de cada trabajo, usando DEM con diferentes tamaños de píxeles. La elección del tamaño de píxel del DEM es según los requerimientos de cada trabajo, teniendo en cuenta que un tamaño de píxel menor va a dar imágenes con mayor detalle, pero sus archivos van a ser pesados, lo que requiere un almacenamiento y tiempo de procesamiento mayor; por el contrario, un tamaño de píxel mayor va a procesar imágenes con menos detalle, pero de manera más rápida y sin ocupar tanto espacio de almacenamiento. Para este trabajo, se usó un DEM de ALOS PALSAR de alta resolución de 12,5 m, obtenido desde los servicios web de *Alaska Satellite Facility* (ASF) de manera gratuita. El tamaño de píxel de 12,5 m es usado por otros trabajos (Farooq y Akram, 2021; Iqbal y otros, 2021; Pathak y Devkota, 2022), algunos especificando que los DEM usados son de ALOS PALSAR.

La elección de este tamaño se debió a que se hicieron pruebas iniciales con un DEM de 30 m obtenido de los servicios web de la *United States Geological Survey* (USGS) *Earth Explorer*, con otro DEM de 5 m facilitado del MINVU (2013), además del escogido de 12,5 m de ALOS PALSAR. El DEM del MINVU, al ser de 5 m, obtuvo imágenes y mapas detallados, pero, el exceso de detalle provocó una sobreestimación de datos, sobre todo en áreas urbanas en calles y avenidas, procesando finalmente mapas de alto detalle, pero con falta de coherencia. Tanto el DEM de la USGS *Earth Explorer*, como el de ALOS PALSAR, mostraron un buen rendimiento y datos apegados a la realidad, pero como el segundo tenía mejor resolución que el primero, se optó por el DEM de ALOS PALSAR. Finalmente, antes de usar el DEM para la obtención de los parámetros morfométricos, éste fue procesado con la herramienta “*Fill (Spatial Analyst)*” de ArcMap 10.5, con la finalidad del relleno de determinadas áreas para la eliminación de imperfecciones que puedan afectar la lectura de los datos topográficos.

3.2. Método estadístico “Frequency Ratio”

El enfoque estadístico para evaluación de susceptibilidad de remociones en masa, aunque es subjetivo, es el más popular, siendo esta evaluación de susceptibilidad mediante la relación entre un grupo de factores condicionantes, y acontecimientos anteriores de remociones en masa (Fayez y otros, 2018). El método estadístico bivariado es aquel en el que se analizan dos variables, para determinar la relación empírica entre ellas (Pradhan y otros, 2012). Es así como, en el método estadístico bivariado, se debe contar con los mapas de parámetros que condicionan a las remociones en masa, y cada uno de estos mapas se superpone con un mapa de inventario de remociones en

masa, lo cual calculará valores de ponderación acorde a las densidades de remociones en masa para todas las clases de cada parámetro (Akgun y otros, 2008; Soeters y Van Westen, 1996).

El método *Frequency Ratio* (FR) es un método estadístico bivariado, siendo uno de los más importantes en la creación de mapas de susceptibilidad, usado en diversidad de trabajos y estudios para el modelamiento y zonación de susceptibilidad de remociones en masa en determinadas áreas de estudio (Abedini y Tulabi, 2018; Addis, 2023; Farooq y Akram, 2021; Fayez y otros, 2018; Lee y Pradhan, 2007; Lee y Sambath, 2006; Pham y otros, 2015; Saleh y otros, 2022; Tazik y otros, 2014). Específicamente, el método *Frequency Ratio* se basa en la relación observada entre la distribución de eventos de remociones en masa, y cada factor que se relaciona con las remociones en masa (Abedini y Tulabi, 2018; Lee y Pradhan, 2007), esto para revelar la correlación entre las ubicaciones de las remociones en masa y los factores estudiados en el área de estudio (Lee y Pradhan, 2007), definiendo la relación entre que ocurran estos fenómenos en una clase, y el área total de esa clase para un factor condicionante de remociones en masa (Pokharel y Thapa, 2019).

El cálculo de FR de las clases de cada factor condicionante es a partir de la relación de cada uno de estos con los eventos de remociones en masa, siendo esta relación la del área donde ocurren remociones en masa con respecto al área total (Lee y Pradhan, 2007), siendo representado de manera cuantitativa (Lee y Sambath, 2006). Un valor de FR igual a 1 es uno promedio; si este valor es mayor a 1, la relación de ocurrencia de remociones en masa y la clase del factor es más alta; pero si el valor es menor a 1, la relación anterior es baja o débil (Addis, 2023; Lee y otros, 2004; Lee y Pradhan, 2007; Lee y Sambath, 2006). Matemáticamente, el FR de cada clase del factor condicionante se expresa de la siguiente manera (Acharya y Lee, 2019):

$$FR = \frac{\left[\frac{N_{pix}(LX_i)}{\sum_{i=1}^m N_{pix}(LX_i)} \right]}{\left[\frac{N_{pix}(X_j)}{\sum_{j=1}^n N_{pix}(X_j)} \right]}$$

En esta ecuación, FR es la relación de frecuencias de la clase i del parámetro o factor condicionante j. $N_{pix}(LX_i)$ es el valor del número de píxeles con remociones en masa en la clase i del parámetro o factor X. $N_{pix}(X_j)$ corresponde al valor del número de píxeles en la variable del parámetro o factor

X_j . La letra m es el número de clases en la variable del factor X_i , y n es el número de parámetros o factores en el área de estudio (Acharya y Lee, 2019; Regmi y otros, 2014a; Regmi y otros, 2014b).

Posteriormente, los FR se normalizan en un rango $[0,1]$ de valores de probabilidad, pasando a ser *Frequency Relative* (RF), siendo los RF de cada clase calculados de la siguiente manera (Acharya y Lee, 2019):

$$RF = \frac{[FR_{ij}]}{[\sum_{i=1}^m FR_{ij}]}$$

Aún el valor de RF tiene el problema de estimar con el mismo peso a todo el conjunto de factores condicionantes. Esto se resuelve calculando la Tasa de Predicción o *Prediction Rate* (PR), lo que permitirá calificar cada factor con el conjunto de datos de la siguiente manera (Acharya y Lee, 2019; Pokharel y Thapa, 2019; Saleh y otros, 2022):

$$PR = \frac{[RF_{max} - RF_{min}]}{[(RF_{max} - RF_{min})_{min}]}$$

Por último, se calcula el *Landslide Susceptibility Index* (LSI) o Índice de Susceptibilidad de Remociones en Masa, valores con los que se crea el mapa de susceptibilidad. El LSI se calcula por medio de la sumatoria del producto del PR de cada factor condicionante, y el RF de cada clase (Acharya y Lee, 2019). Matemáticamente se explica de la siguiente manera (Acharya y Lee, 2019; Pokharel y Thapa, 2019):

$$LSI = \sum [PR * RF]$$

Los valores del LSI para la creación del mapa de susceptibilidad usa una práctica en común, que es la división del inventario de datos totales de remociones en masa, usando unos para la creación del mapa de susceptibilidad llamados “puntos de entrenamiento”, y el otro set, que es usado en un posterior método de validación del mapa final que nos diga si éste es confiable o no, son llamados “puntos de prueba”. La división más usada, que se replicará en este trabajo (Figura 3.1), es la del uso de un 70% del conjunto de datos como “puntos de entrenamiento”, y un 30% como “puntos de prueba” (Acharya y Lee, 2019; Addis, 2023; Fayez y otros, 2018; Pham y otros, 2015; Pokharel y Thapa, 2019; Regmi y otros, 2014a; Shano y otros, 2021; Wu y otros, 2016b).

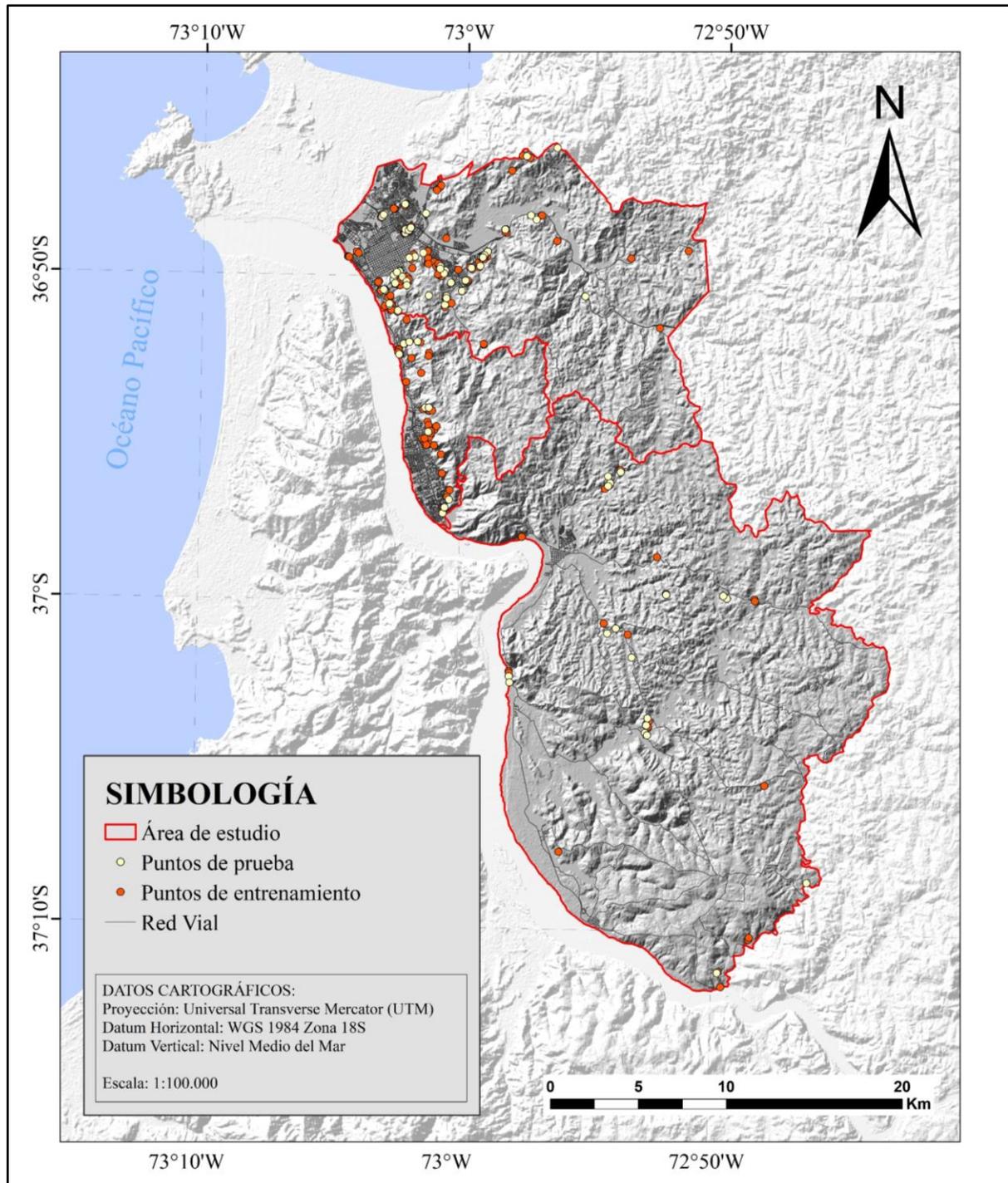


Figura 3.1: Mapa del área de estudio con puntos del inventario de remociones en masa. Elaboración propia.

3.3. Parámetros considerados

Van Westen y otros (2006) describieron los procedimientos para la evaluación del riesgo de remociones en masa, mostrando cuatro grupos de datos de entrada: factores ambientales, factores desencadenantes, ocurrencias históricas de remociones en masa, y elementos en riesgo. Señala la importancia de obtener la “probabilidad espacial de iniciación de remociones en masa”, descrita como la probabilidad condicional de inicio de una remoción en masa con un volumen y tipo específico en alguna locación, dado un cierto evento desencadenante, especificando que esta probabilidad correspondería a la susceptibilidad.

Los factores ambientales son una serie de capas de datos, los cuales se prevé que cada uno tenga cierta participación en la ocurrencia de remociones en masa, siendo utilizados como factores de causa en la predicción de remociones en masa en el futuro (Van Westen y otros, 2008), por lo que, estos factores ambientales son, específicamente, los que condicionan las remociones en masa.

La selección que se haga de estos factores va a depender del tipo de remoción en masa, el tipo de terreno, y la disponibilidad de datos y recursos existentes (Van Westen y otros, 2008). La combinación del inventario de remociones en masa con los mapas de factores ambientales, con el uso de métodos estadísticos, va a dar como resultado un mapa de susceptibilidad de remociones en masa (Van Westen y otros, 2006).

Para el caso de este estudio, se analizaron trabajos de mapeo de susceptibilidad de remociones en masa (e.g. Acharya y Lee, 2019; Akgun y otros, 2008; Shano y otros, 2021; Tazik y otros, 2014), mediante los cuales se escogieron los siguientes parámetros:

3.3.1. Grado de la pendiente

Es la variable topográfica básica para el mapeo de la susceptibilidad de remociones en masa (Akgun y otros, 2008), siendo considerada la más importante en los movimientos gravitacionales (Van Westen y otros, 2008) estando en directa relación con el movimiento de estos fenómenos (Kartic Kumar y otros, 2015). Por lo general, los resultados de FR que obtienen las clases de este parámetro van a ser menores a 1 en pendientes con ángulos más pequeños, y un aumento del FR a medida que el grado de pendiente vaya en aumento, esto es porque los suelos con grados bajos van a tener menores tensiones de corte, y, por el contrario, estas van a ser mayores con grados de pendiente más elevados (Akgun y otros, 2008; Mezughi y otros, 2011).

Los mapas de grado de pendiente son creados a partir de un DEM. En el área de estudio, y mediante el programa ArcMap 10.5, se usó el DEM de ALOS PALSAR y la herramienta “*Slope (Spatial Analyst)*” del ArcToolbox, para la creación del mapa de grados de pendiente. Prácticamente todos los trabajos de mapeo de susceptibilidad de remociones en masa, independiente del tipo de método estadístico, usan esta variable (e.g. Abedini y Tulabi, 2018; Acharya y Lee, 2019; Akgun y otros, 2008; Kartic Kumar y otros, 2015; Mezughi y otros, 2011; Pradhan y Lee, 2010; Shano y otros, 2021; Tazik y otros, 2014; Wu y otros, 2016b), aunque la división de los rangos de ángulos para la división de clases es variada y sujeta a la arbitrariedad.

3.3.2. Orientación de la pendiente

Este parámetro se define como el azimuth de la pendiente (Gorsevski y otros, 2000), el cual posee el potencial de influir en las propiedades físicas de ésta (Dai y otros, 2001). La influencia es, principalmente, en los procesos hidrológicos de las pendientes, como en la evapotranspiración (Berhane y otros, 2020; Gorsevski y otros, 2000; Saadatkah y otros, 2015), la humedad o grado de saturación del suelo (Berhane y otros, 2020; Tazik y otros, 2014), la vegetación, además de la penetración de las raíces (Berhane y otros, 2020). Además de los procesos hidrológicos, el aspecto puede comprometer la estabilidad de una ladera mediante la exposición a la luz solar (Gorsevski y otros, 2000; Iqbal y otros, 2021; Tazik y otros, 2014) o la acción de vientos secos (Tazik y otros, 2014), además de la distribución de discontinuidades, lo que controla la ocurrencia de procesos de remoción en masa (Berhane y otros, 2020; Tazik y otros, 2014). En las orientaciones de las pendientes, influye la exposición al sol y a la sombra que van a meteorizar de diferente forma el material de las laderas, siendo generalmente una meteorización química en laderas dominadas por la sombra, y de tipo física en las que están expuestas al sol (Jaque, E., comunicación personal, 2023). Las pendientes con varias direcciones de orientación también pueden propiciar movimientos en masa de tipo cósmico, ya que van a poseer diferentes respuestas a la dirección de movimiento de bloques o a la dirección de propagación de las ondas sísmicas (Xu y otros, 2017). Generalmente es una variable que, así como el grado de la pendiente, todos los trabajos de susceptibilidad de remociones en masa la usan (e.g. Abedini y Tulabi, 2018; Acharya y Lee, 2019; Berhane y otros, 2020; Iqbal y otros, 2021; Mezughi y otros, 2011; Pradhan y Lee, 2010; Shano y otros, 2021; Tazik y otros, 2014; Wu y otros, 2016b).

Para los trabajos de investigación, la capa de orientación de pendiente (o aspecto) se crea a partir de un DEM. En la herramienta ArcMap 10.5, con el DEM del área de estudio de 12.5 m, y la herramienta “*Aspect (Spatial Analyst)*”, se creó el mapa de orientación.

3.3.3. Elevación

La elevación es un factor que controla la estabilidad de una ladera (Moradi y Rezaei, 2014), siendo la parte fundamental de la topografía, influyendo en los parámetros topográficos, como en la pendiente y la orientación (He y otros, 2012; Iqbal y otros, 2021). La elevación está relacionada con los factores de las lluvias, tipo de suelo, tipo de vegetación, además de la cobertura vegetal, factores que desestabilizan las pendientes (Du y otros, 2017), aunque la influencia de la elevación sobre la estabilidad de las laderas al afectar estos factores de cantidad de lluvia y cobertura vegetal sería una influencia indirecta (Shano y otros, 2021). El factor de la elevación es ampliamente utilizado en el estudio de susceptibilidad (e.g. Abedini y Tulabi, 2018; He y otros, 2012; Iqbal y otros, 2021; Regmi y otros, 2014a; Regmi y otros, 2014b; Shano y otros, 2021; Tazik y otros, 2014; Wu y otros, 2016b).

Para este trabajo, el mapa de elevación es creado con el DEM de ALOS PALSAR de 12.5 m, reclasificando sus valores.

3.3.4. Curvatura

La curvatura representa la morfología de las pendientes (Moradi y Rezaei, 2014), y mide la tasa de cambio de éstas (Kumar y otros, 2019). Existen diversos tipos de curvatura, pero la división general más usada en estudios de remociones en masa es la siguiente:

Curvatura del perfil (*profile curvature*): es la curvatura de la superficie en la dirección de la pendiente más pronunciada (Alkhasawneh y otros, 2013), también descrita como la curvatura en el plano vertical paralelo a la dirección de la pendiente (Nefeslioglu y otros, 2008). Como este tipo de curvatura representa la medida de la tasa de cambio del ángulo de la pendiente, su importancia radica en el control directo de la velocidad de un flujo de agua a lo largo de la pendiente, y, por ende, la erosión de esta (Alkhasawneh y otros, 2013; Nefeslioglu y otros, 2008; Troch y otros, 2002). Existen tres tipos (Figura 3.2): convexa, si la pendiente disminuye con la distancia; plana, si la pendiente es más o menos constante; y cóncava, si es que la pendiente aumenta con la distancia (Troch y otros, 2002).

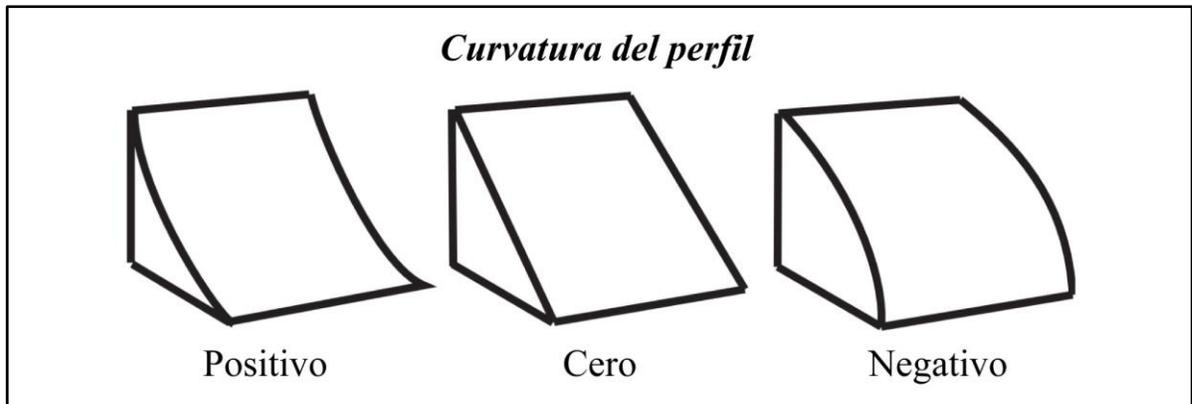


Figura 3.2: Diagrama de la curvatura del perfil. Modificado de Heine y otros (2004).

Curvatura en planta (*plan curvature*): corresponde a la curvatura en un plano horizontal (Alkhasawneh y otros, 2013); o bien como la curvatura de una línea de contorno, que es formada por el cruce de un plano horizontal con la superficie (Nefeslioglu y otros, 2008). Refleja el cambio en el ángulo de la orientación de la pendiente (aspecto), por lo que su influencia radica en la divergencia o convergencia en el flujo de agua cuesta abajo, condicionando la ocurrencia de remociones en masa (Nefeslioglu y otros, 2008; Troch y otros, 2002). Sus tipos son los siguientes (Figura 3.3): convergente, cuando el ancho de la pendiente aumenta con la distancia; uniforme, si es que el ancho se mantiene más o menos constante; y divergente, si el ancho disminuye con la distancia (Troch y otros, 2002).

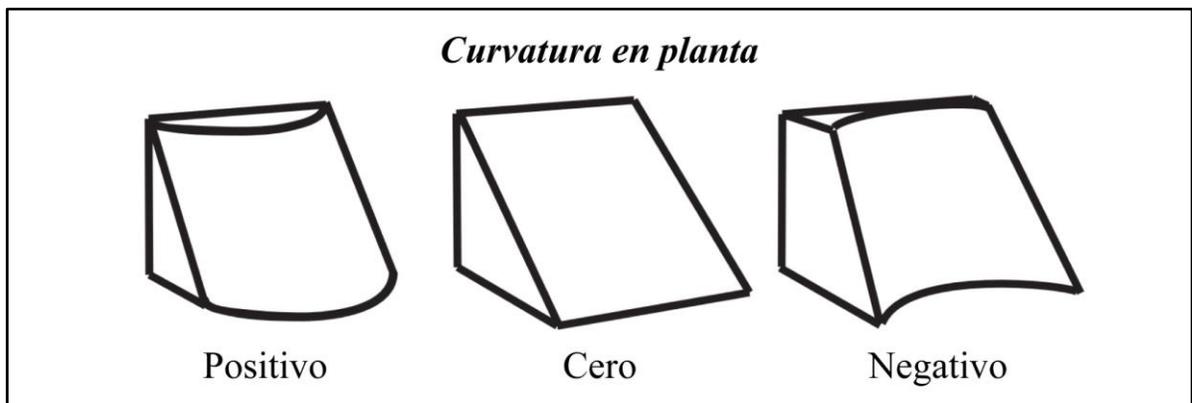


Figura 3.3: Diagrama de la curvatura en planta. Modificado de Heine y otros (2004).

Curvatura general (*general curvature*): también llamada curvatura total, es la curvatura de la propia superficie (Wood, 1996 en Alkhasawneh y otros, 2013). Como mide la tasa de cambio de la

pendiente, su identificación es con la ayuda de las curvaturas de perfil y en planta (Kumar y otros, 2019), relacionándose de la siguiente manera (Alkhasawneh y otros, 2013):

$$\textit{Curvatura general} = \textit{Curvatura del perfil} + \textit{Curvatura en planta}$$

Los tipos de curvatura general son los siguientes: si el valor numérico de la curvatura es negativo, su superficie es cóncava hacia arriba; cuando el valor es cero, la superficie es plana; y si el valor es positivo, significa que la superficie es convexa hacia arriba (Lee y Pradhan, 2007; Lee y Sambath, 2006; Moradi y Rezaei, 2014; Pradhan y Lee, 2010). Por lo general, las superficies convexas dispersan los escurrimientos de manera equitativa, siendo más estables; pero las superficies cóncavas concentran el agua en los extremos inferiores, perdiendo estabilidad (Stocking y otros, 1972 en Acharya y Lee, 2019).

Los estudios de remociones en masa que ocupan curvatura, generalmente especifican qué tipos de curvatura usan, habiendo trabajos en los que se usan las curvaturas del perfil y en planta por separado (e.g. He y otros, 2012; Sheng y otros, 2022; Wu y otros, 2016b; Yesilnacar y Topal, 2005), otros en los que sólo se usa la curvatura en planta (e.g. Fayez y otros, 2018; Kartic Kumar y otros, 2015; Regmi y otros, 2014a; Regmi y otros, 2014b; Saadatkah y otros, 2015) o la del perfil (e.g. Luo y otros, 2019), otros en los que solo se ocupa la curvatura general o total (e.g. Acharya y Lee, 2019; Lee y Pradhan, 2007; Lee y Sambath, 2006; Pham y otros, 2015; Pradhan y Lee, 2010; Saleh y otros, 2022; Shano y otros, 2021), y algunos en los que se usan las tres (e.g. Alkhasawneh y otros, 2013). En este trabajo, se usó solo la curvatura general, con el fin de no sobrecargar de parámetros la base del mapa de susceptibilidad con las demás curvaturas; además por el hecho de que, como se hace referencia anteriormente, la curvatura general es la suma de las curvaturas de perfil y en planta. El mapa de curvatura es creado a partir del DEM del área de estudio, en ArcMap 10.5, con la herramienta “*Curvature (Spatial Analyst)*”.

3.3.5. Litología

El factor litológico ha sido ampliamente documentado y usado en estudios de susceptibilidad de remociones en masa (e.g. Abedini y Tulabi, 2018; Akgun y otros, 2008; Shano y otros, 2021; Sheng

y otros, 2022; Tazik y otros, 2014; Wu y otros, 2016b; Yesilnacar y Topal, 2005). Por lo general, las características litológicas de un terreno ejercen control sobre la geomorfología (Dai y otros, 2001; Yalcin y otros, 2011), incidiendo en los procesos de remociones en masa por las características de meteorización de los materiales (Dai y otros, 2001), como también por la variabilidad litológica que conduce a una diferencia en la resistencia y permeabilidad de las rocas y suelos (Yalcin y otros, 2011). Así, la relevancia de la litología para la susceptibilidad es la determinación de las propiedades ingenieriles de los tipos de rocas (Corominas y otros, 2014).

Para los trabajos de susceptibilidad, se usa un mapa litológico, el cual, en la mayoría de los casos, es creado a partir de mapas previos en el área que se desee estudiar. Para este trabajo, el mapa litológico se creó a partir de ciertos mapas geológicos de la asignatura de Geología de Campo II (2009, 2012, 2015, 2019, 2021) de la carrera de Geología de la Universidad de Concepción.

3.3.6. Distancia a redes de drenaje

El factor de la distancia a los ríos o redes de drenaje es uno que controla la estabilidad de las pendientes, siendo los grados de saturación de los materiales de una ladera los que afectan directamente a su estabilidad, influyendo en la resistencia al corte de los materiales (Iqbal y otros, 2021; Moradi y Rezaei, 2014; Yalcin y otros, 2011), finalmente ocasionándose la inestabilidad por el socavamiento producido por los ríos, modificando el terreno por medio de la erosión, influyendo en el inicio de remociones en masa (Dai y otros, 2001; Saha y otros, 2002). También hay que tener en cuenta el aporte de aguas subterráneas, los cuales pueden proporcionar el flujo base de ríos y/o arroyos más pequeños (Moradi y Rezaei, 2014).

La herramienta usada en los trabajos que usan este parámetro (e.g. Abedini y Tulabi, 2018; Acharya y Lee, 2019; Akgun y otros, 2008; Iqbal y otros, 2021; Kornejady y otros, 2015; Pradhan y Lee, 2010; Regmi y otros, 2014a; Shano y otros, 2021) para la creación de los mapas de distancia a redes de drenaje, es la distancia euclidiana, además del propio archivo de la red hídrica del área que se busque estudiar, los cuales pueden ser calculados con herramientas GIS mediante un DEM, o bien, propiciados directamente por otras fuentes. Para este trabajo, se usó la herramienta “*Euclidean Distance (Spatial Analyst)*” en ArcMap 10.5, usando la red de drenaje del trabajo del MINVU (2013) que se facilitó para este trabajo.

3.3.7. Uso/cobertura de suelo

Las relaciones del uso/cobertura de suelo con la estabilidad de pendientes y la ocurrencia de remociones en masa, son generalmente complicadas (Berhane y otros, 2020), siendo importante este parámetro en la inconsistencia que presentan las pendientes (Abedini y Tulabi, 2018). El impacto y relevancia para la susceptibilidad a remociones en masa radica en los factores de la cobertura de la cubierta, profundidad y cohesión de las raíces, tipo de vegetación y su peso (Corominas y otros, 2014). La relación complicada del uso/cobertura de suelo con la estabilidad de las pendientes es por varias razones. Un suelo sin vegetación o con áreas degradadas va a ser más susceptible a remociones en masa relacionadas por la erosión, así como los diferentes usos del suelo y planificación territorial se relacionan fuertemente con la presencia o ausencia de humedad, escorrentía, infiltración y erosión, afectando las características de los suelos subyacentes, y ejerciendo el control en la aparición de remociones en masa (Berhane y otros, 2020). El uso/cobertura de suelo es ampliamente usado en trabajos de estudios de susceptibilidad de remociones en masa (e.g. Abedini y Tulabi, 2018; Berhane y otros, 2020; Pradhan y Lee, 2010; Regmi y otros, 2014a; Saadatkhan y otros, 2015; Shano y otros, 2021; Tazik y otros, 2014).

3.3.8. Densidad de fallas/lineamientos

Las estructuras geológicas y las fallas son factores que predisponen a las remociones en masa (Luo y otros, 2019), ya que, en zonas de lineamientos (falladas, fracturadas, plegadas), las unidades litológicas de la zona están parcialmente rotas, y con un buen desarrollo de fracturas, situación que predispone a pendientes de una zona a la inestabilidad y posteriores procesos de remociones en masa (Berhane y otros, 2020). Estas zonas de falla, además de ser débiles y estar fracturadas, permiten que circule fluido que faciliten los procesos de erosión y mejoren el desarrollo de la presión del agua de los poros (Berhane y otros, 2020). Para los trabajos de susceptibilidad, generalmente es usada la herramienta “distancia a fallas/lineamientos” (e.g. Abedini y Tulabi, 2018; Berhane y otros, 2020; Luo y otros, 2019; Pradhan y Lee, 2010; Tazik y otros, 2014; Wu y otros, 2016b; Yesilnacar y Topal, 2005), que funciona de la misma manera que el parámetro “distancia a redes de drenaje”, explicado con anterioridad. Sin embargo, para este trabajo se usó la “densidad de fallas/lineamientos”, caracterizada por la frecuencia de fracturas por unidad del área (Kumar y otros, 2019) y parámetro que también ha sido usado en trabajos de determinación de susceptibilidad (Mezughy y otros, 2011; Yesilnacar y Topal, 2005).

El mapa de densidad de lineamientos se creó en el programa ArcMap 10.5 mediante el uso de la herramienta “*Line Density (Spatial Analyst)*”, para el cual, se necesita un *shapefile* de fallas/lineamientos para su creación. En éste trabajo se crearon tres mapas para la evaluación del peso de cada uno en el mapa de susceptibilidad final, cada uno con un *shapefile* diferente: el primero es un *shapefile* de lineamientos propios, trazados mediante el uso de la herramienta “*Hillshade (Spatial Analyst)*” en el DEM de 12,5 m, creando ocho mapas con azimuth diferentes (0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315°), y exagerando la escala vertical Z, para hacer los trazos manuales de lineamientos con la mayor y más clara información posible; el segundo *shapefile* es de los lineamientos y fallas trazados en los mapas de Geología de Campo II (2015, 2019, 2021), los mismos mapas que fueron usados en la confección del mapa litológico (ver sección 4.1.5); y el tercer archivo *shapefile* combina los dos *shapefile* mencionados anteriormente, teniendo tanto los lineamientos trazados de forma manual, como los lineamientos y fallas de los mapas de Geología de Campo II.

Un aspecto importante para tener en cuenta es la validez de los lineamientos creados a mano. Al usar los mapas creados por la herramienta “*Hillshade (Spatial Analyst)*”, además de poder marcar las estructuras, también se pueden marcar algunos cauces de redes de drenaje, los que pueden generar confusión y errores al ir trazando los lineamientos, pudiendo interpretar estos cauces como parámetros estructurales. Para minimizar esto, la metodología usada, para el trazado de los lineamientos en este estudio, fue de usar tanto los mapas creados mediante el *hillshade*, y sobreponer el *shapefile* de las redes de drenaje del área de estudio. Así, al ir marcando los lineamientos, se visualiza que éste no pertenezca a un cauce de río, reduciendo el margen de error.

3.4. Validación del modelo

Para cerciorarse de que el mapa de susceptibilidad creado con el método FR tenga coherencia, tanto con los puntos de remociones en masa de entrenamiento (70%), como con los puntos de prueba (30%), hay que usar un método de validación que nos entregue un resultado satisfactorio. Para el caso de este trabajo, el método escogido es el método de Área Bajo la Curva ROC (AUC).

ROC es la abreviación de “*Receiver Operating Characteristics*”. El uso de un gráfico ROC es para la visualización, organización y selección de clasificadores, todo esto en función de su rendimiento, siendo un gráfico bidimensional relativamente simple (Fawcett, 2006). La representación

bidimensional del rendimiento es la curva ROC, mostrando la probabilidad de que las remociones en masa sean clasificadas como verdaderos positivos, contra la probabilidad de que se clasifiquen como falsos positivos (Gorsevski y otros, 2000). Si se busca comparar a los clasificadores, lo mejor es hacerlo con un único valor escalar que represente al rendimiento de cada uno, siendo el cálculo del área bajo la curva ROC (AUC) el más común (Fawcett, 2006).

El cálculo del AUC se hace siguiendo varios pasos. Primero, al estimar n clases de índices de susceptibilidad de remociones en masa, se pueden definir $n+1$ umbrales, siendo el primer valor del umbral ($i=1$) menor que el índice de susceptibilidad mínimo observado en la categoría más estable, y el último valor del umbral ($i=n+1$) mayor al índice máximo de susceptibilidad de categoría más sensible. Cada valor del umbral va a formar una matriz de confusión, en la que se definen cuatro tipos de píxeles (Sheng y otros, 2022; Vakhshoori y Zare, 2018), los que, según lo descrito por Fawcett (2006), y llevándolo al escenario de las remociones en masa, se clasifican de la siguiente manera: si un punto es clasificado con ocurrencia del fenómeno y cae en un área donde ocurre uno, es un píxel verdadero positivo (TP); si este mismo punto está en un área donde no ocurra un fenómeno, se trata de un píxel falso positivo (FP); por el contrario, si un punto es clasificado sin ocurrencia de remociones en masa y está en un área donde ocurre una, se trata de un píxel falso negativo (FN); pero si este punto cae en un sector donde no ocurre alguno de estos fenómenos, es un píxel verdadero negativo (TN).

Posteriormente, las estadísticas que se pueden calcular con la cantidad de píxeles en cada umbral son dos, la tasa de verdaderos positivos (TPR), y la tasa de falsos positivos (FPR), y se calculan de la siguiente manera (Sheng y otros, 2022; Vakhshoori y Zare, 2018):

$$TPR = TP / (TP + FN)$$

$$FPR = FP / (TN + FP)$$

Los píxeles de TP y FN dividen a los de TP, debido a que éstos representan los píxeles de remociones en masa dentro de las clases por encima y debajo, respectivamente, del valor del umbral. Por otra parte, los píxeles de TN y FP dividen a los de los FP, ya que éstos son los píxeles

sin remociones en masa dentro de las clases por debajo y encima, respectivamente, del valor del umbral (Vakhshoori y Zare, 2018).

La TPR se traza en el eje Y del gráfico de la curva ROC, y la FPR se traza en el eje X (Figura 3.4.a), formando el punto (1, 1) en la curva para el primer umbral ($i=1$), y el punto (0, 0) para el último umbral ($i=n+1$). Finalmente, el cálculo del AUC va a ser de la siguiente manera (Abbas y otros, 2021; Sheng y otros, 2022; Vakhshoori y Zare, 2018):

$$AUC = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{1}{2} \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2} * (y_i + y_{i+1})$$

El AUC es una sección del gráfico ROC (Figura 3.4.b), siendo representado por un número que corresponde a la probabilidad de que se clasifique una instancia positiva (ocurrencia de fenómeno), por sobre una instancia negativa (no ocurrencia de fenómeno) que se escoja al azar (Fawcett, 2006; Kartic Kumar y otros, 2015), siendo un método de validación cuantitativo de precisión de la predicción (Pradhan, 2011). Su valor está en un rango entre 0 y 1, pero la adivinación al azar es la que origina en el gráfico ROC la línea diagonal entre los parámetros (0,0) y (1,1), y esta área posee un valor de AUC de 0,5 por lo que, un valor realista no puede tener un AUC menor a 0,5 (Fawcett, 2006). A su vez, sobre el valor de 0,5, el AUC posee la siguiente clasificación: malo o pobre (0,5-0,6), promedio o regular (0,6-0,7), bueno (0,7-0,8), muy bueno (0,8-0,9), y excelente (0,9-1) (Chen y otros, 2022; Kartic Kumar y otros, 2015). Esto demuestra que, si el AUC está más cercano a 1, el resultado del análisis es excelente, pero si el AUC posee valores más próximos a 0,5, el resultado del análisis no es preciso (Tsangaratos y Ilia, 2016).

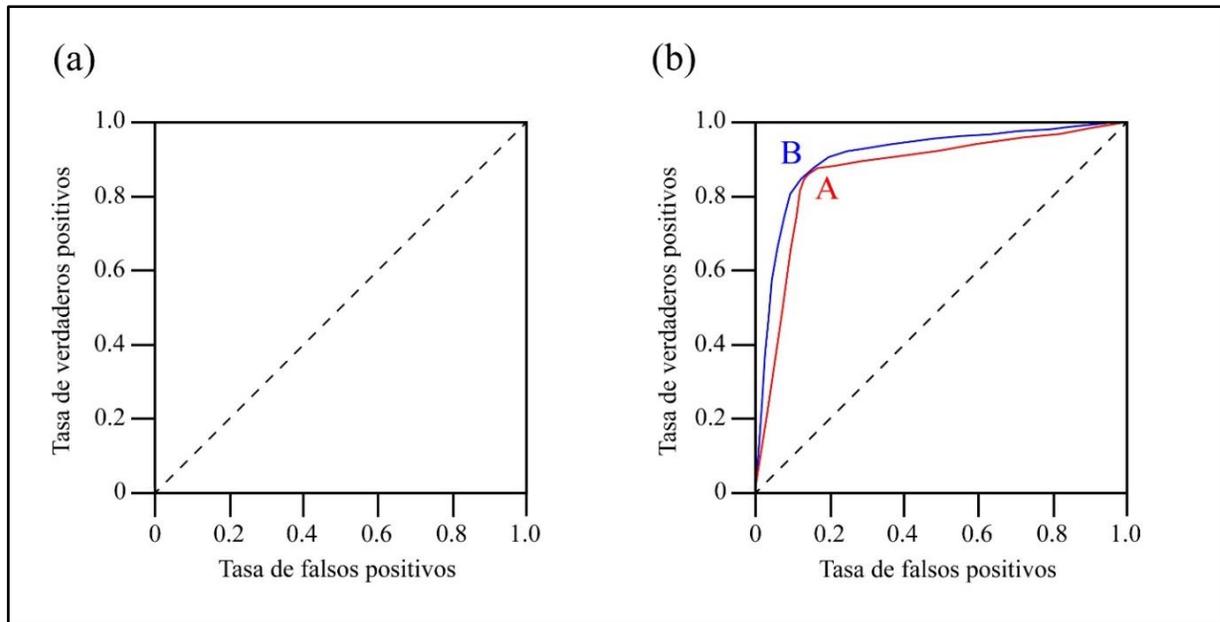


Figura 3.4: Esquemas de gráficos ROC y el AUC. (a) Gráfico de ROC, la línea segmentada es la originada por la probabilidad de adivinación al azar. (b) Gráfico de ROC con dos curvas. La curva B tendrá mayor valor AUC que A. Modificado de Fawcett (2006).

La herramienta que entregará tanto el gráfico ROC, como el valor del AUC del mapa de susceptibilidad, es de una extensión descargable gratuita de ArcMap llamada “ArcSDM Tools” (Brown y otros, 2017). Específicamente, la opción *Calculate ROC Curves and AUC Values* es la que se usará en este trabajo, la cual funciona adicionando el mapa de susceptibilidad en la opción *Classification Models*, y el *shapefile* de puntos de remociones en masa en la opción de *True Positives*, ambos teniendo que estar en la misma proyección geográfica, para que el programa pueda evaluar la tasa de verdaderos y falsos positivos del *shapefile* de puntos, y posteriormente entregar el gráfico con la curva, y el valor de AUC del mapa de susceptibilidad para clasificar su rendimiento, todo esto de manera automática. Se usarán para la validación tanto los sets de puntos de entrenamiento (70%), como los de prueba (30%), ya que, para los primeros, el valor del AUC reflejará la tasa de éxito del modelo, y para los segundos, el valor del AUC mostrará la tasa de predicción (Vakhshoori y Zare, 2018).

4. RESULTADOS

4.1. Mapas de parámetros condicionantes

Los primeros resultados obtenidos, fueron los mapas de aquellos parámetros condicionantes mencionados con anterioridad (ver sección 3.3). Estos mapas son los que van a ser usados, posteriormente, para la obtención del mapa de susceptibilidad del área de estudio.

4.1.1. Grado de la pendiente

Para este mapa, se usó como base la división propuesta por Falcón y otros (2010b) para los grados de peligro del mapa de peligro de remociones en masa de Concepción – Talcahuano – Hualpén y Chiguayante definidos como: bajo, medio y alto, siendo los rangos de: $0^\circ - 15^\circ$; $15^\circ - 25^\circ$ y $> 25^\circ$ respectivamente. Sin embargo, el rango de $0^\circ - 15^\circ$ fue dividido en dos: $< 5^\circ$ y $5^\circ - 15^\circ$, por lo que, finalmente, la variable de pendiente en este trabajo fue dividida en 4 clases: $< 5^\circ$, $5^\circ - 15^\circ$, $15^\circ - 25^\circ$, y $> 25^\circ$ (Figura 4.1). El uso de estos rangos se debe a que, el trabajo de Falcón y otros (2010b) es de los pocos que zonifican dos de las tres comunas del área de estudio, además, el área de la clase $> 25^\circ$ representa, aproximadamente, un 3,6% del área total, por lo que, dividir aún más esta zona podría ocasionar una subestimación de los valores del FR. La división del rango $0^\circ - 15^\circ$ es debido a que, al observar la Figura 4.1, si no se realiza una división, los sectores verdes y amarillos hubieran quedado como uno solo, lo que colocaría en la misma categoría a sectores de pendiente en terreno mayormente forestal y de algunos cerros (amarillo), con las áreas urbanas (verde), lo que ignora el hecho de que las pendientes en ciudad, generalmente, son planas.

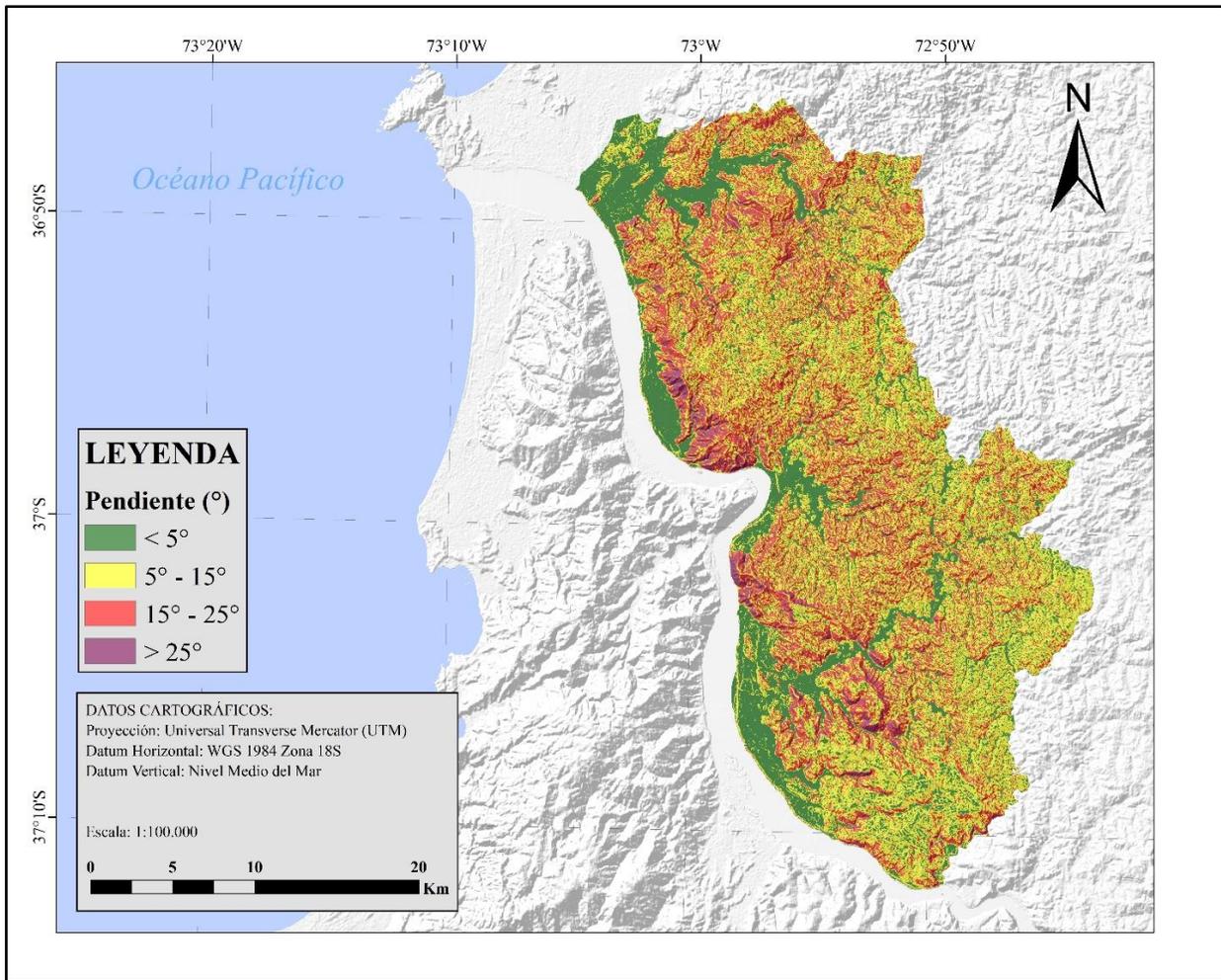


Figura 4.1: Mapa de grados de pendientes. Elaboración propia.

4.1.2. Orientación de la pendiente

Para el mapa creado para este parámetro (Figura 4.2), fueron definidas 9 clases, separándose de la siguiente manera: plano (-1), norte (337,5° - 22,5°), noreste (22,5° - 67,5°), este (67,5° - 112,5°), sueste (112,5° - 157,5°), sur (157,5° - 202,5°), suroeste (202,5° - 247,5°), oeste (247,5° - 292,5°), y noroeste (292,5° - 337,5°). Esta clasificación es la misma que entrega el programa ArcMap 10.5, agrupando cada conjunto de ángulos de azimuth, correspondiendo a su orientación en referencia a los puntos cardinales e intercardinales, dando como resultado las 9 clases mencionadas anteriormente. La clasificación es automática y por defecto.

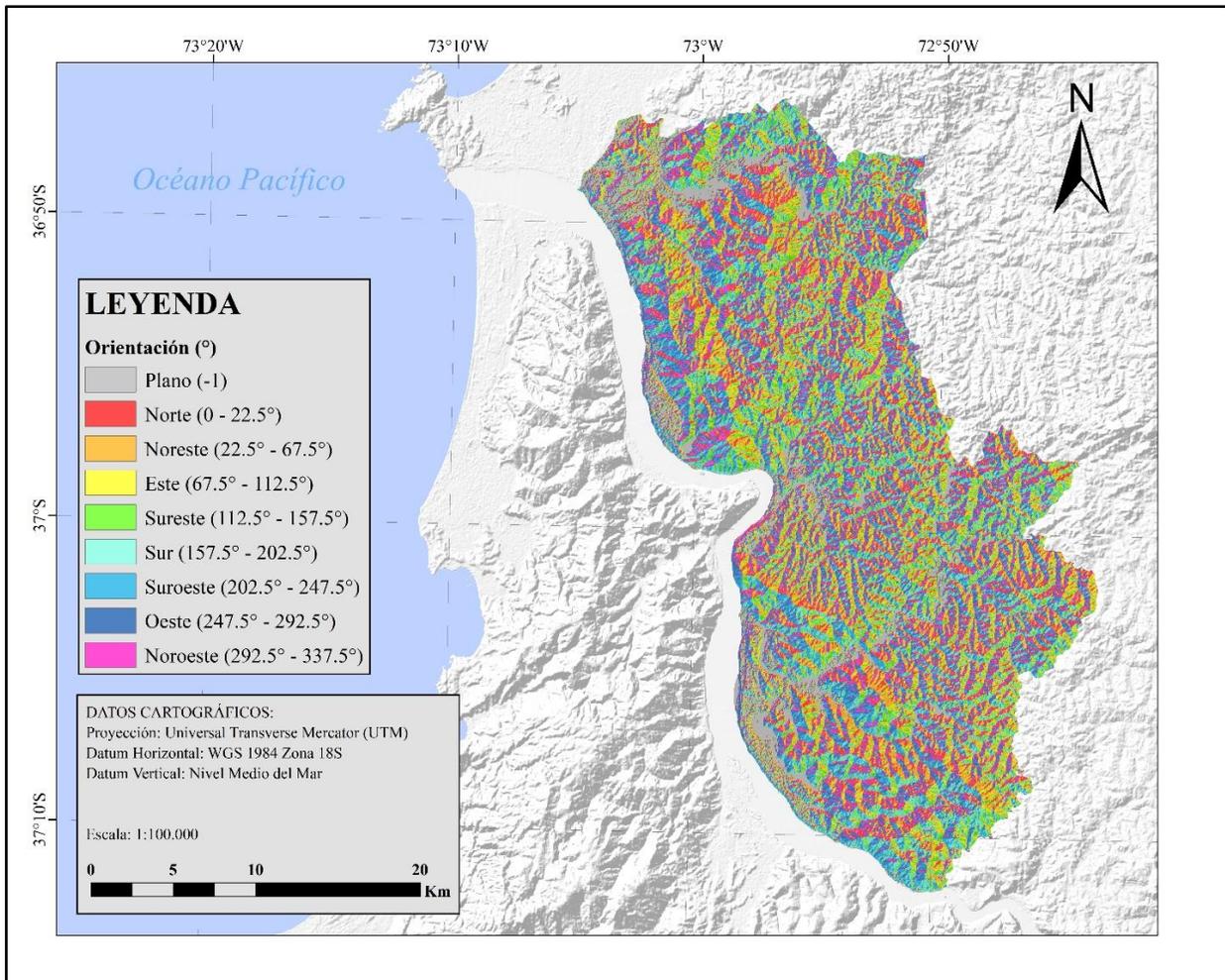


Figura 4.2: Mapa de orientación (aspecto) de pendientes. Elaboración propia.

4.1.3. Elevación

El área de estudio no presenta zonas costeras o con elevaciones del nivel del mar, siendo la mínima de 26 metros sobre el nivel del mar (msnm), y la altura máxima de 489 msnm. La clasificación se obtuvo reclasificando el DEM inicial en 8 clases, las cuales fueron: < 40 msnm, 40 – 60 msnm, 60 – 80 msnm, 80 – 100 msnm, 100 – 200 msnm, 200 – 300 msnm, 300 – 400 msnm, y > 400 msnm (Figura 4.3). A través de pruebas iniciales de rangos de elevación, la división en rangos de 20 msnm para los primeros 100 msnm fue la que mejor diferenciaba a la mayoría de las áreas urbanas, de los sectores de cerro en los que empezaba a aumentar la pendiente; además, estas clases son las que poseen la mayor cantidad de puntos de remociones en masa y áreas reducidas, y se esperaba que, al aumentar la elevación, aumentara también el valor del FR. La división de rangos de 100 msnm,

a partir de la elevación a los 100 msnm, está basada en la misma división que fue usada por Gajardo (2022) en sectores del área de estudio, teniendo en cuenta la geomorfología; otra razón es que, desde los 100 msnm, ya se estancaría el aumento de los valores de FR, empezando a disminuir; además, al hacer los cálculos del FR, se observó que, a diferencia de la clase de 100 – 200 msnm (ver sección 4.2.3), las demás clases registraban una cantidad pequeña de remociones en masa, por lo que hacer rangos más acotados, dejaría más clases con valores de FR iguales a 0.

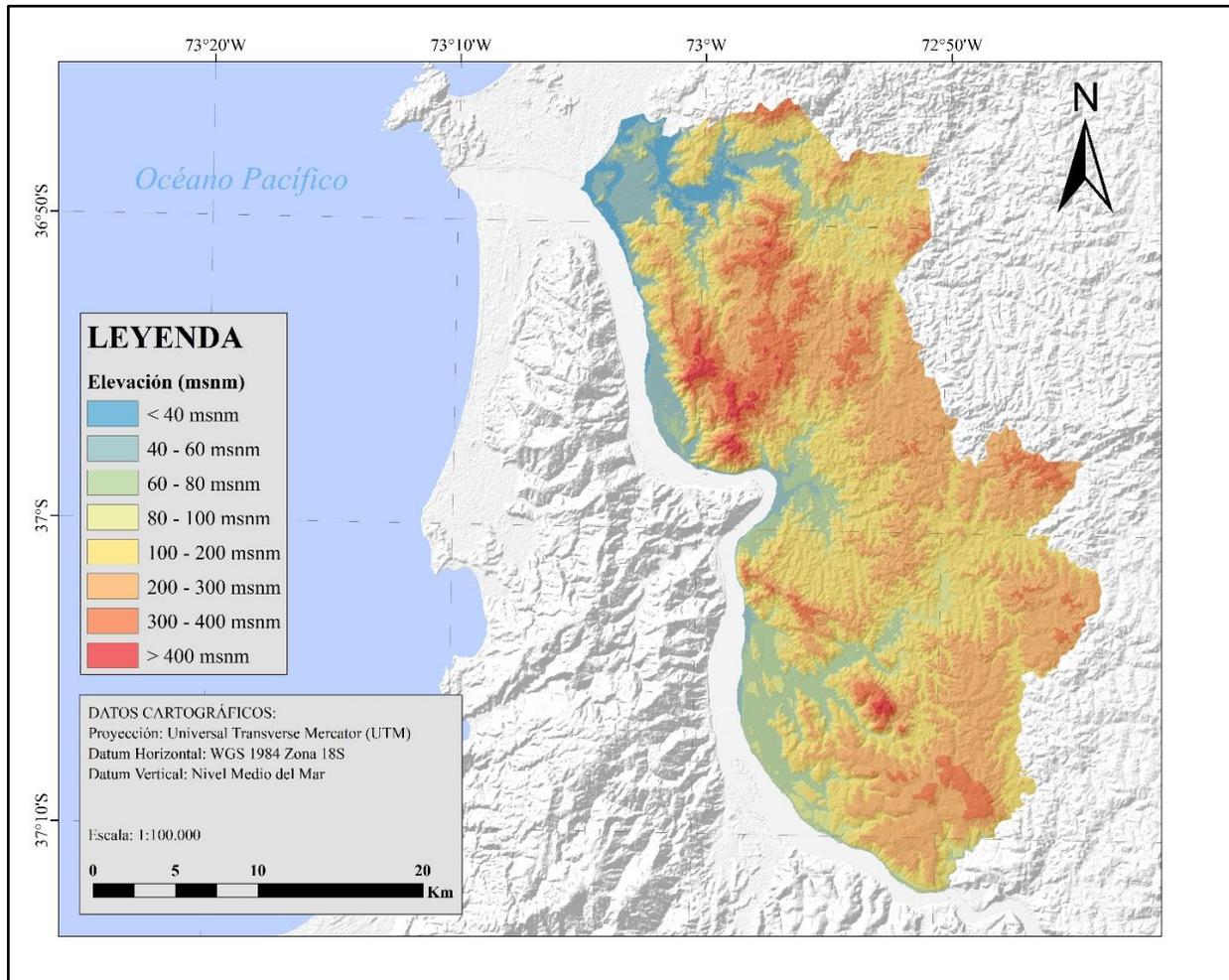


Figura 4.3: Mapa de elevaciones del área de estudio. Elaboración propia.

4.1.4. Curvatura

Los valores de este parámetro, usados para crear el mapa de curvatura (Figura 4.4), fueron clasificados en las tres clases, anteriormente mencionadas, para la curvatura general (ver sección 3.3.4): cóncava, plana y convexa. No obstante, al clasificar mediante los quiebres del histograma

del mapa, y los valores positivos y negativos de éstos, se notó que, al dejar todos los valores positivos como convexos y los negativos como cóncavos, había una irregularidad en el entorno de las ciudades cuyos sectores sin pendientes debieran estar en la clase “plana”, lo cual no se cumplía completamente. Así que, buscando que estos sectores fueran coherentes, se usaron otros rangos numéricos en las clases, los mismos usados por Wubalem (2021) y Gajardo (2022), que fueron: cóncava ($< [-]2$), plana ($[-]2 - [+]2$), y convexa ($> [+]2$). Como los valores de las clases cóncavas y convexas son píxeles pequeños y dispersos, en la figura 4.4 se amplió un cuadro de un sector de los cerros de Chiguayante, para poder apreciar de mejor manera la existencia de estas clases.

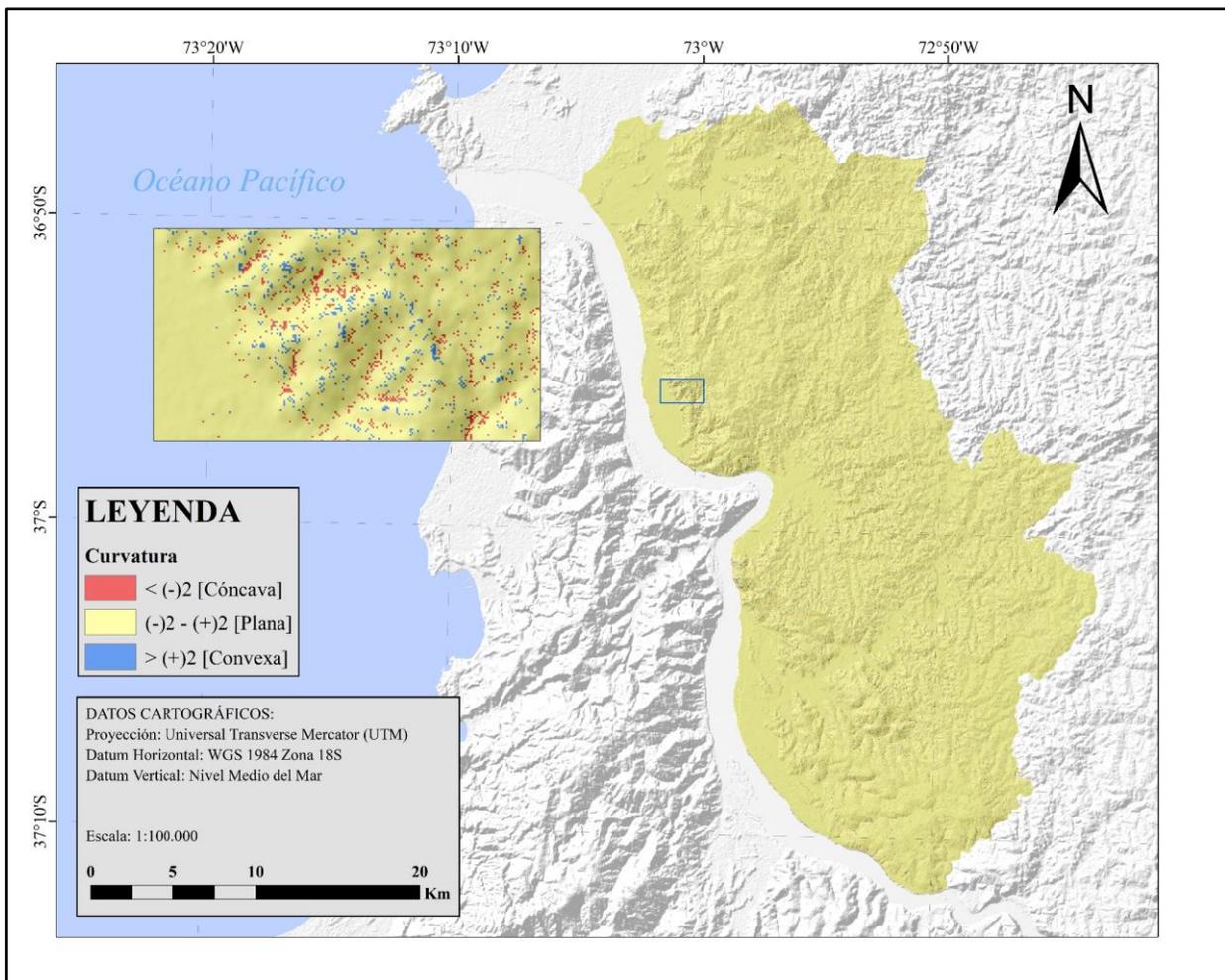


Figura 4.4: Mapa de curvatura del área de estudio. Elaboración propia.

4.1.5. Litología

Las clases de este parámetro, correspondientes a las formaciones geológicas mencionadas con anterioridad (ver sección 2.2.1), son: Serie Oriental, Batolito Costero del Sur, Formación Santa Juana, Formación Quiriquina, Formación Curanilahue, Formación Andalién, Formación Huachipato, y Depósitos cuaternarios (Figura 4.5). En ensayos iniciales previos de uso del modelo FR para obtener mapas de prueba, se observó una influencia exagerada que ejercía la Formación Quiriquina en todo el mapa. Para corregir esto, se usó un mapa litológico que unió las formaciones Quiriquina y Curanilahue en una sola clase. Esta unión se debió a que, las dos formaciones son de tipo sedimentario; en los sectores de cerros isla, que es donde afloran, generalmente están las dos presentes; además de que estas formaciones están unidas por paraconformidad, no presentando una deformación entre ellas, como se evidencia en un costado del cerro Chacabuco al lado de calle Paicaví, pero sí estando separadas por una época temporal relativamente corta.

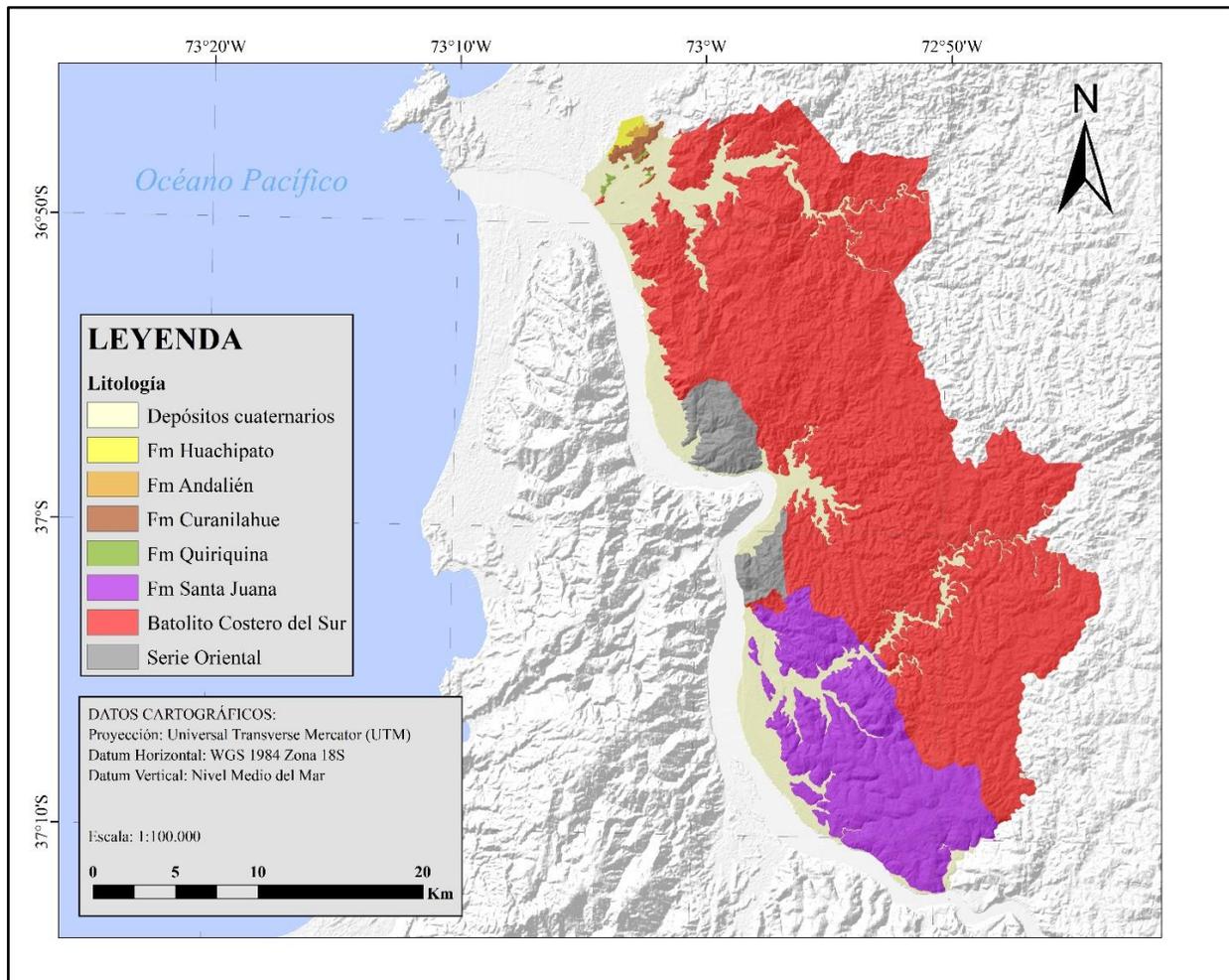


Figura 4.5: Mapa de litología del área de estudio. Elaboración propia en base a los mapas de Geología de Campo (2009, 2012, 2015, 2019 y 2021).

4.1.6. Distancia a redes de drenaje

En el mapa de este parámetro, las clases fueron divididas siguiendo las usadas por Iqbal y otros (2021), Kornejady y otros (2015) y Pradhan (2011), finalmente siendo las mismas clases de los modelos de Akgun y otros (2008) y Gajardo (2022), las cuales fueron: < 50 m, 50m – 100m, 100m – 150m, 150m – 200m, y > 200m (Figura 4.6). No existe un consenso general acerca de la clasificación de las distancias a las redes de drenaje, lo que ha hecho que investigadores usen diferentes distancias (Akgun y otros, 2008). Debido a lo anterior, el uso de las clases en este estudio se argumenta debido a que, anteriormente, ya se han usado estas clases en el trabajo de Gajardo (2022) en 2 comunas del área de estudio; además, la existencia de la clase de > 200 m engloba gran parte del área urbana, pudiendo caracterizar el hecho de que, en esta área, no hay mayor presencia de redes de drenaje cercanas.

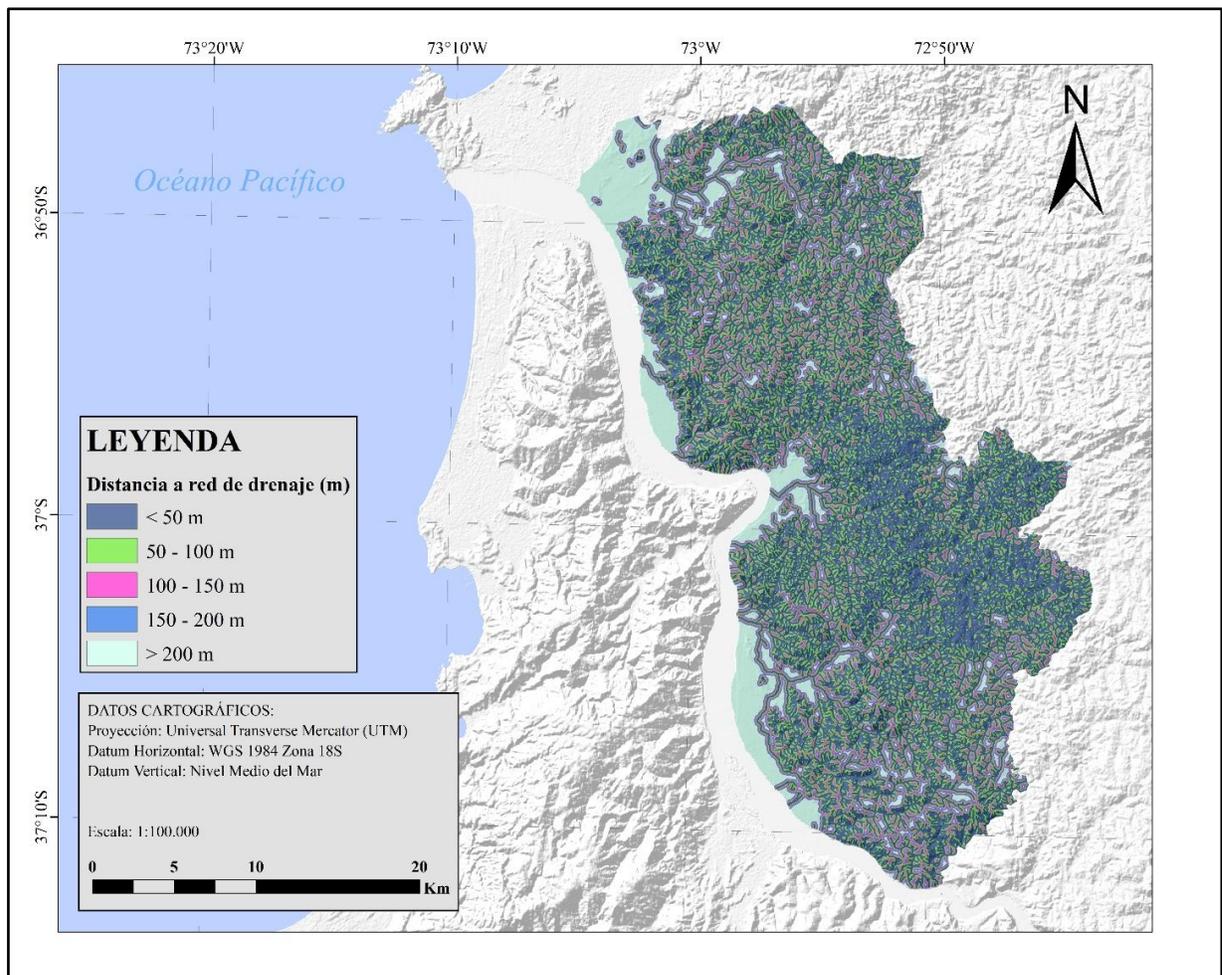


Figura 4.6: Mapa de distancia a redes de drenaje área de estudio. Elaboración propia en base a *shapefile* del MINVU (2013).

4.1.7. Uso/coberturas de suelo

Para este mapa, fue facilitado un *raster* de cobertura de suelo de Jaque y otros (2021) para la región del Biobío, teniendo 7 clases para nuestra área de estudio: Bosque nativo, plantaciones forestales, matorrales, áreas agrícolas, áreas urbanas, suelos descubiertos, y cuerpos de agua (Figura 4.7).

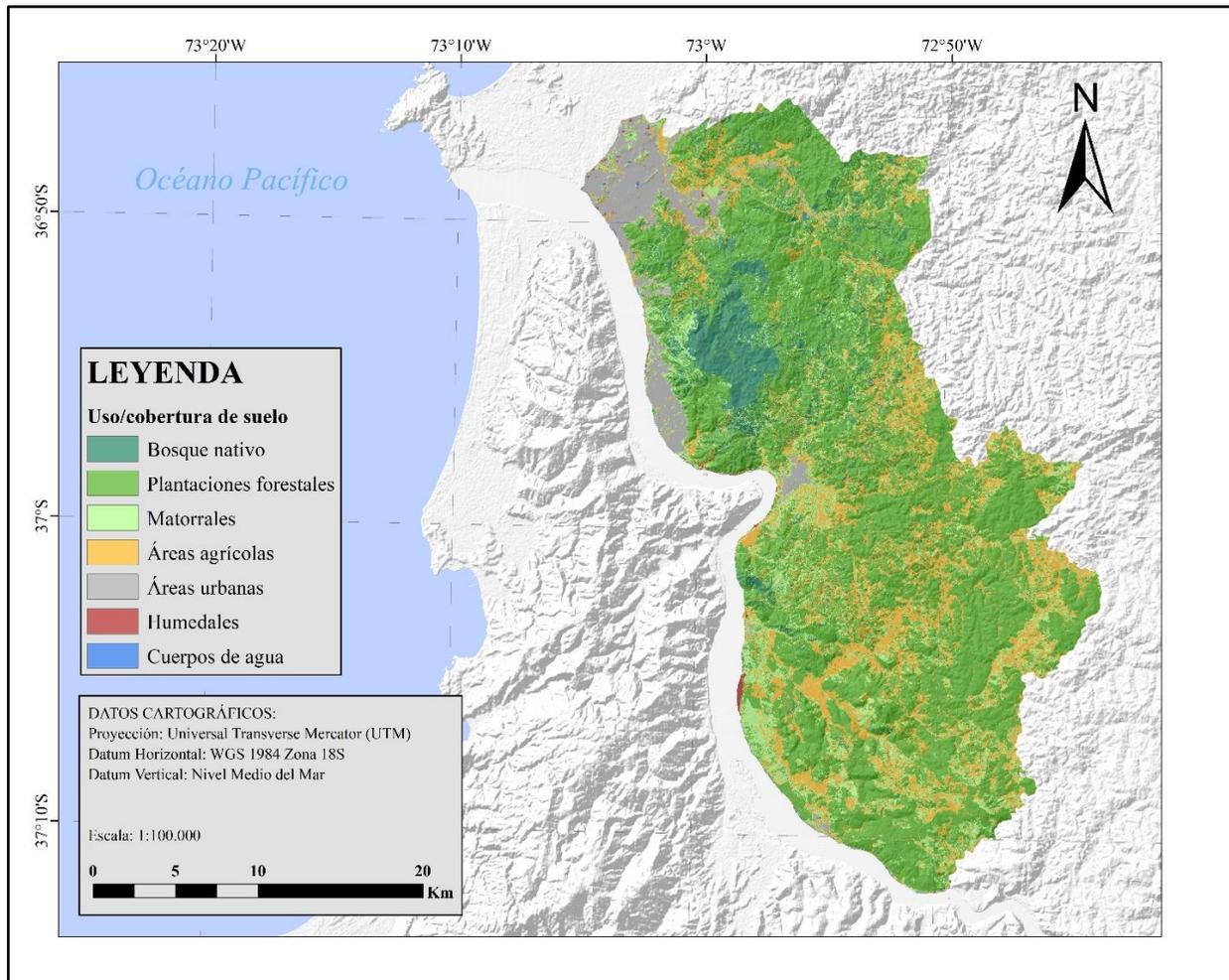


Figura 4.7: Mapa de uso/cobertura de suelo del área de estudio. Elaboración propia en base a datos de Jaque y otros (2021).

4.1.8. Densidad de fallas/lineamientos

Después de tener los mapas iniciales, producto del uso de la herramienta “*Line Density (Spatial Analyst)*” para cada *shapefile*, la clasificación de cada uno de los tres mapas de densidad de fallas y/o lineamientos, es la que se muestra en la tabla 4.1:

Tabla 4.1: Clases de los mapas de densidad de fallas/lineamientos. Elaboración propia

Densidad de lineamientos propios	Densidad de fallas/lineamientos de Geología de Campo II	Densidad de lineamientos propios + fallas/lineamientos de Geología de Campo II
0 – 0,187 sq/km	0 – 0,105 sq/km	0 – 0,328 sq/km
0,187 – 0,450 sq/km	0,105 – 0,301 sq/km	0,328 – 0,671 sq/km
0,450 – 0,687 sq/km	0,301 – 0,474 sq/km	0,671 – 0,952 sq/km
0,687 – 0,925 sq/km	0,474 – 0,632 sq/km	0,952 – 1,218 sq/km
0,925 – 1,150 sq/km	0,632 – 0,783 sq/km	1,218 – 1,499 sq/km
1,150 – 1,375 sq/km	0,783 – 0,941 sq/km	1,499 – 1,812 sq/km
1,375 – 1,625 sq/km	0,941 – 1,122 sq/km	1,812 – 2,155 sq/km
1,625 – 1,887 sq/km	1,122 – 1,348 sq/km	2,155 – 2,577 sq/km
1,887 – 2,275 sq/km	1,348 – 1,597 sq/km	2,577 – 3,124 sq/km
2,275 – 3,188 sq/km	1,597 – 1,921 sq/km	3,124 – 3,983 sq/km

Los tres mapas creados (Figura 4.8) fueron divididos en las diez clases mencionadas en la tabla 4.1, y la división usada para las clases fue mediante el uso de los quiebres naturales, o *Natural Breaks (Jenks)*, debido a que no existía un consenso general en la clasificación de las densidades de fallas y lineamientos en los trabajos estudiados.

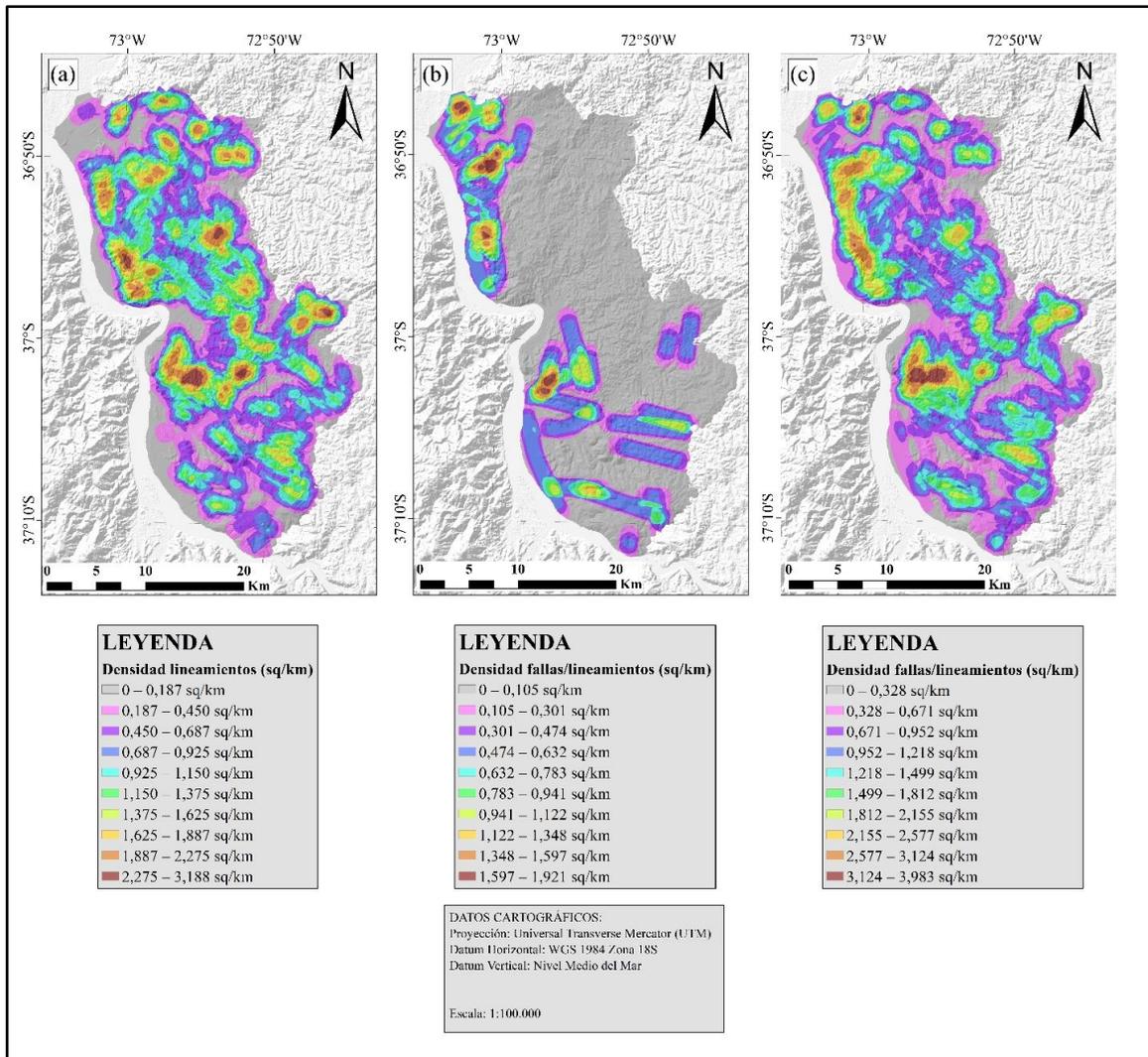


Figura 4.8: Mapas de densidad de fallas/lineamientos del área de estudio. (a) Base de lineamientos propios. (b) Base de fallas/lineamientos de Geología de Campo II. (c) Bases lineamientos propios y fallas/lineamientos de Geología de Campo II. Elaboración propia.

4.2. Valores del modelo FR

Los cálculos asociados a la creación del mapa de susceptibilidad de remociones en masa fueron los anteriormente mencionados en la metodología. La base de estos, fueron los píxeles de las clases de cada parámetro, además del set de puntos de entrenamiento de remociones en masa convertido a *raster*. El cálculo de los píxeles de remociones en masa, que están dentro de las clases de un parámetro, se hizo por medio de la herramienta “*Tabulate Area (Spatial Analyst)*” de ArcMap 10.5 y, posteriormente, se tomaron estos píxeles, junto con los píxeles de las clases de cada parámetro, para hacer los cálculos de FR (*Frequency Ratio*), RF (*Frequency Relative*, o frecuencia relativa) y

PR (*Prediction Rate*, o tasa de predicción), los que se muestran en el anexo III. Algo a considerar es que, todos los mapas de parámetros o factores deben tener tanto la misma cantidad de píxeles de la sumatoria de sus clases, como los mismos píxeles de remociones en masa.

4.2.1. Grado de la pendiente

Considerando lo dicho en la metodología del significado de los valores del FR, los valores pertenecientes al grado de pendientes (Figura 4.9) muestran que, al aumentar éstos, el valor de FR también lo hace, observando una influencia alta de susceptibilidad a partir de la clase $15^\circ - 25^\circ$ al ser su FR de 1,89 mayor a 1, pero acentuándose mucho más en la clase $> 25^\circ$ con un FR de 5,23. Las pendientes con grados de 0° a 15° van a ser más estables.

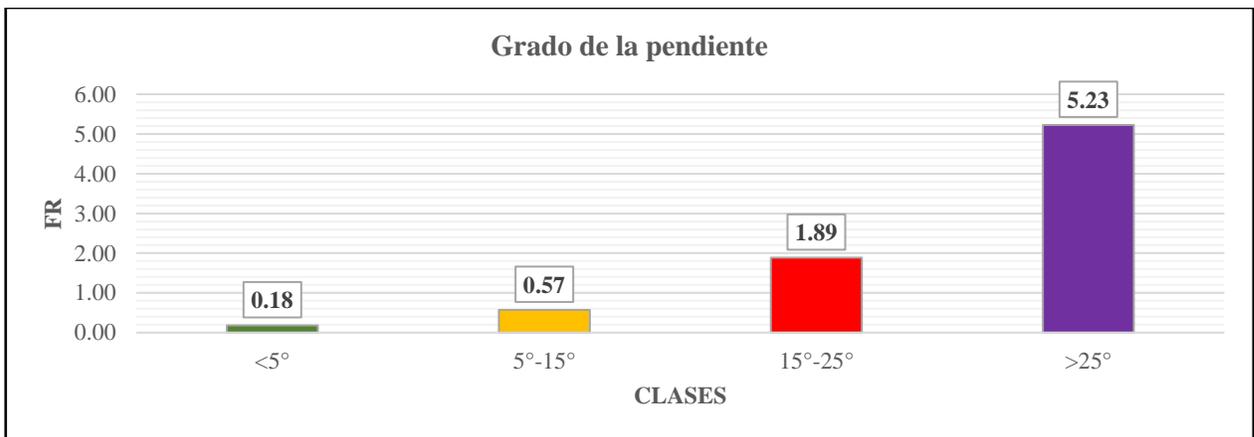


Figura 4.9: Diagrama de Clases vs FR del parámetro grado de la pendiente. Elaboración propia.

Estos valores ajustan a la realidad, es decir, tienen lógica y es un resultado esperable. Esto es ya que el FR va a ir en aumento a medida que los grados en una pendiente se van haciendo más empinados, teniendo actualmente una influencia de la susceptibilidad que empieza a ser alta a los 15° , para ir en ascenso en la clase superior de los grados de pendiente. Hasta los 25° se consideró un número idóneo para poder observar la susceptibilidad de ahí en adelante, ya que no se esperaba la presencia de sectores con barrancos muy pronunciados en el área de estudio, estando presente esta característica en los sectores costeros de la región.

4.2.2. Orientación de la pendiente

En los valores de FR de la orientación de la pendiente (Figura 4.10), las clases que presentaron una influencia alta de susceptibilidad fueron el conjunto de ángulos entre el oeste y el norte, teniendo

valores de FR de 1,34 para el oeste, 1,39 en el noroeste, y 1,11 en el norte. El otro valor que se aleja de estas orientaciones, y que, fue el más alto de este parámetro, es la clase del sureste con un valor de FR de 1,48.

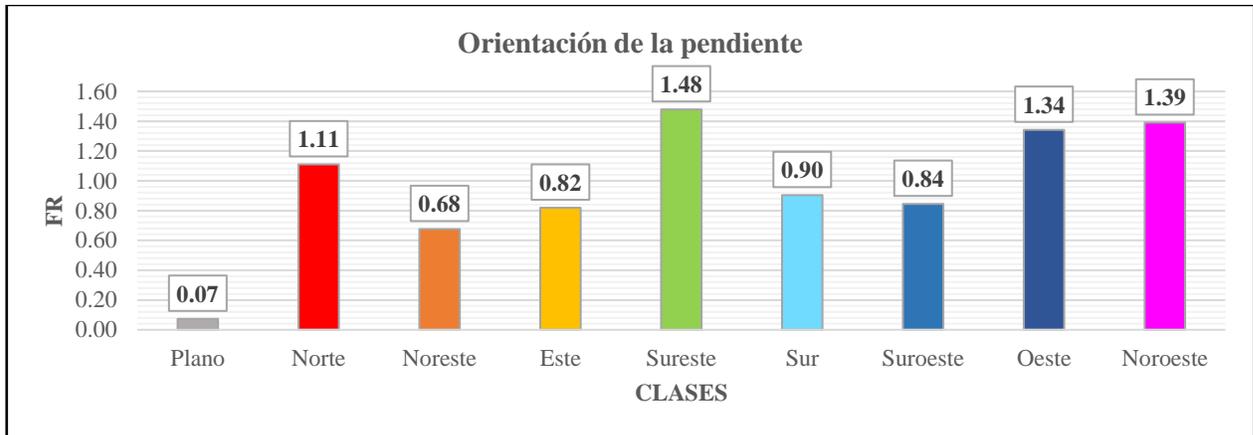


Figura 4.10: Diagrama de Clases vs FR del parámetro orientación de la pendiente. Elaboración propia.

El mayor índice de susceptibilidad, desde las pendientes con orientación oeste al norte, y en el sureste, nos dice que hay una menor influencia de actividades relacionadas a la exposición a la luz solar. Probablemente, en estas áreas dominan los sectores de sombra que mantienen la humedad en el terreno, lo que es esperable en una zona generalmente húmeda en periodos fríos, como en el AMC. Las áreas de cada orientación son generalmente equitativas, evidenciado por los píxeles de cada clase (Anexo III), lo que hace que la influencia de susceptibilidad sí esté más dominada por la cantidad de remociones en masa en cada clase, lo que se ajusta a los resultados obtenidos, al ser las orientaciones de oeste a norte, y la sureste, las que poseen mayor cantidad de fenómenos. Los resultados obtenidos y presentados en la figura 4.10, poseen algunas diferencias con los obtenidos por Gajardo (2022) en las orientaciones oeste y norte, sin embargo, las orientaciones sureste y noroeste presentan resultados similares.

4.2.3. Elevación

El FR en las clases de la elevación (Figura 4.11) muestra un aumento progresivo de la predisposición a remociones en masa desde los 40 msnm, hasta los 100 msnm. Específicamente, entre los 40 y 60 msnm, el FR es de 2,65. Desde los 60 a 80 msnm es de 3,82. Finalmente, entre los 80 y 100 msnm se alcanza su valor máximo con 4,48. Las clases menores a 40 msnm y superiores a 100 msnm son menos proclives a remociones en masa.

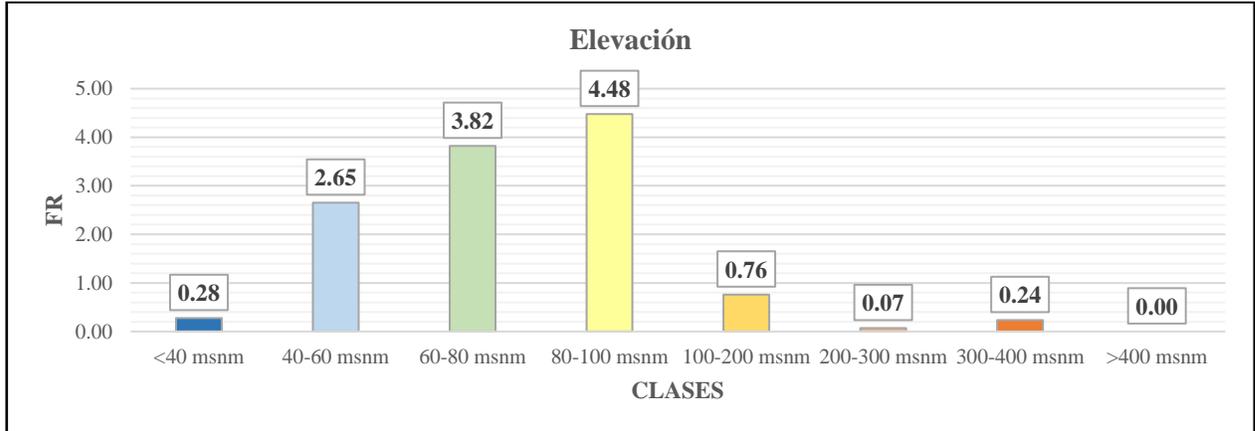


Figura 4.11: Diagrama de Clases vs FR del parámetro elevación. Elaboración propia.

El descenso abrupto del FR, en la clase de 100 a 200 msnm, hasta valores de poco índice de susceptibilidad, a pesar de poseer 49 píxeles de remociones en masa, es explicado por el hecho de tener un cambio en la agrupación de niveles de elevación, tomando más valores, por lo que el área de esta clase también es más grande, ejerciendo su control en los valores del FR.

4.2.4. Curvatura

Los valores del FR de la curvatura (Figura 4.12) son estables, aunque cercanos al promedio de susceptibilidad, a excepción de la clase convexa (> 2), con un valor de FR igual a 2,23.

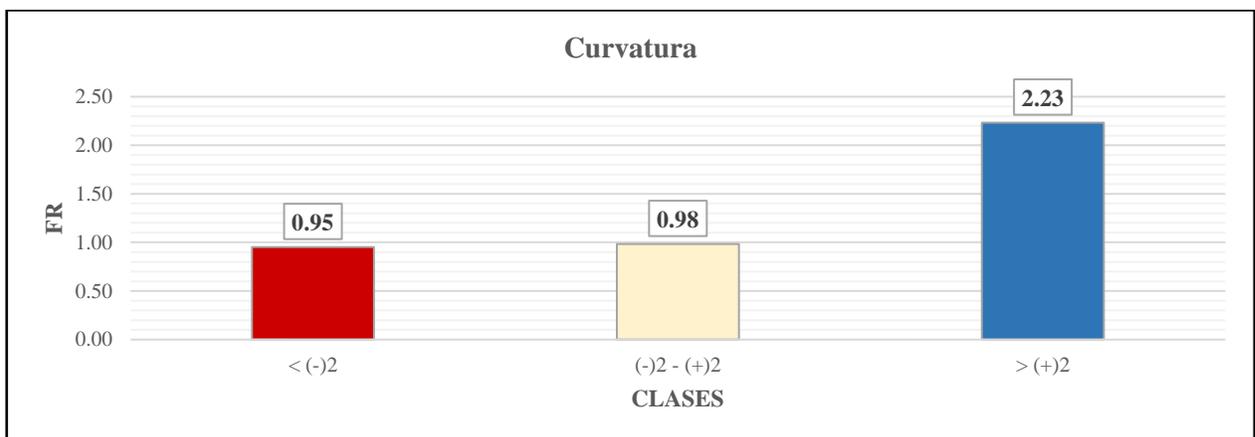


Figura 4.12: Diagrama de Clases vs FR del parámetro curvatura. Elaboración propia.

Estos valores evidencian la baja susceptibilidad de los sectores planos. Los resultados muestran una diferencia bibliográfica con las superficies cóncavas y convexas, ya que, lo general es que las superficies convexas, al dispersar los escurrimientos equitativamente, sean más estables, lo contrario de las superficies cóncavas que concentran el agua y pierden estabilidad (Stocking y otros, 1972 en Acharya y Lee, 2019). Nuestros resultados nos muestran lo contrario, siendo las superficies cóncavas las con menor índice de susceptibilidad, aunque muy cerca del promedio, y siendo las convexas las que tienen un valor de FR más grande.

4.2.4. Litología

Para los valores de FR de la litología inicial (Figura 4.13), es decir, con sus formaciones separadas, la mayor influencia de susceptibilidad se encuentra en la Formación Quiriquina, con un FR de 14,04, y las otras clases donde los terrenos son más propensos a remociones en masa son en la formación Curanilahue (FR=1,42), el Batolito Costero del Sur (FR=1,14), y en los depósitos cuaternarios (FR=1,19), siendo el terreno del resto de las formaciones menos proclive a la susceptibilidad.

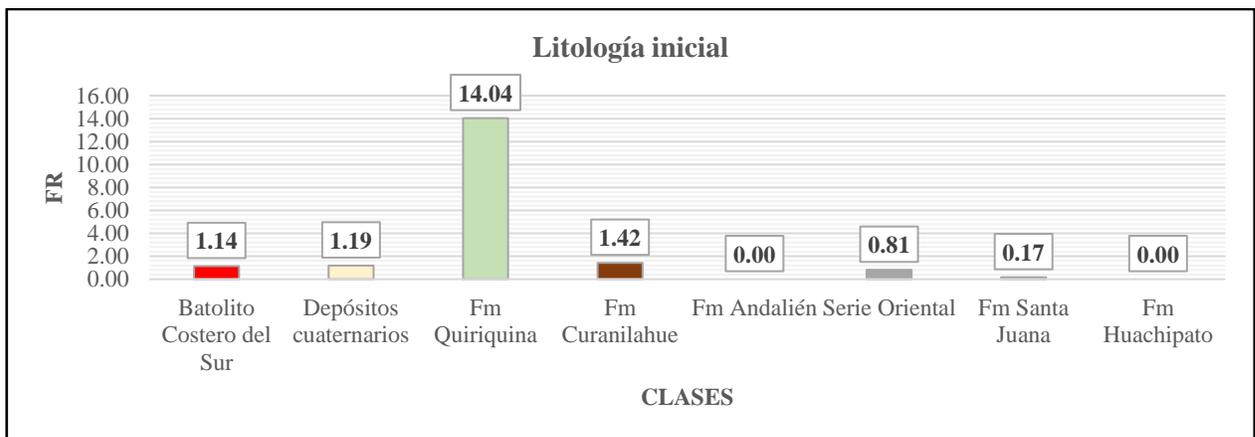


Figura 4.13: Diagrama de Clases vs FR del parámetro litología inicial. Elaboración propia.

Ahora, por pruebas iniciales en la creación de mapas de susceptibilidad, el valor de FR de Formación Quiriquina se consideró una sobreestimación, lo que se buscó aminorar al unir las formaciones Quiriquina y Curanilahue, siendo este mapa el usado para la creación posterior de mapas de susceptibilidad. El FR de la clase, al unir estas dos formaciones, posee un FR de 4,37. El resto de los valores de FR de las formaciones (Figura 4.14), es el mismo que el del parámetro inicial de litología.

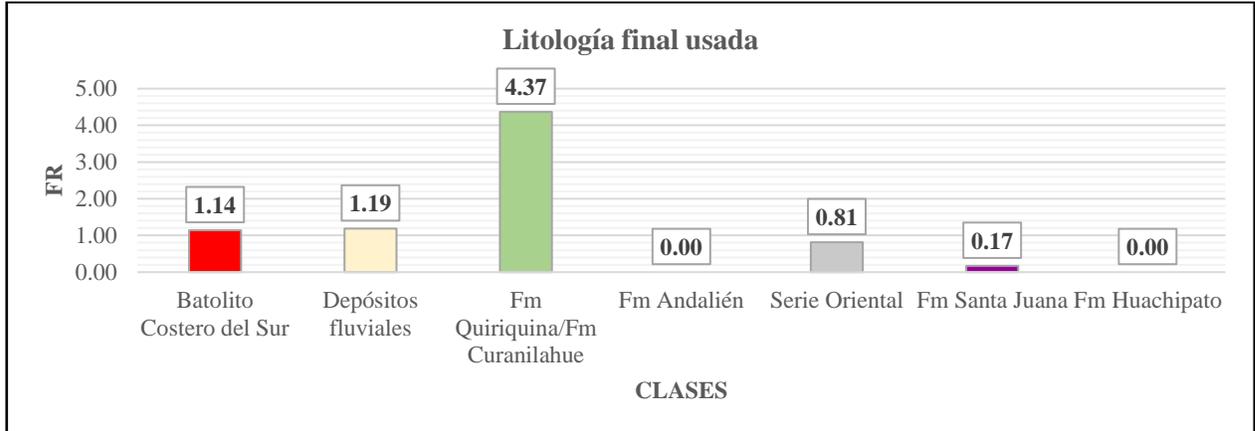


Figura 4.14: Diagrama de Clases vs FR del parámetro litología final usada. Elaboración propia.

El mayor problema se presenta en la Formación Quiriquina. La influencia de esta, por separado, se consideró excesiva, por el hecho de las características que influyen en el resultado de su FR (14,04). La formación presenta alrededor del 1,5% de píxeles de remociones en masa (3 píxeles), muy por debajo del 76,4%, aproximadamente, que posee el Batolito Costero del Sur (149 píxeles). Sin embargo, el área total de la formación Quiriquina, dentro del área de estudio, es de un 0,10%, a diferencia del Batolito Costero del Sur, que representa el 66,9% del área de estudio. Esto indica que el área más pequeña va a tener una mayor influencia de susceptibilidad. Si se diera el caso de que, los píxeles de remociones en masa de la Formación Quiriquina, fueran los fenómenos presentes en el Batolito Costero del Sur, no tendrían la misma influencia que están teniendo en el área de Formación Quiriquina.

La unión de las formaciones Quiriquina y Curanilahue muestra un rendimiento más controlado, evidenciado por su FR (Figura 4.14). Este valor, al compararlo con los FR de cada formación en el trabajo de Gajardo (2022), se pueden observar valores altos en las dos. Finalmente, el valor que genera incógnitas es el del Batolito Costero del Sur ya que, si bien posee un FR de 1,14 que evidencia una alta influencia en la susceptibilidad, el valor debería mostrar valores más elevados, al ser la formación en la que se encontraron la mayor cantidad de remociones en masa, siendo la única limitante del valor de FR la gran magnitud de esta litología.

4.2.6. Distancia a redes de drenaje

Para los valores de FR de la distancia a redes de drenaje (Figura 4.15), bajo los 100 m, van a estar las clases más estables; y por sobre los 100 m, es donde va a haber un aumento en la predisposición de remociones en masa, siendo la clase de 150 – 200 m la más proclive, con un FR de 2,80.

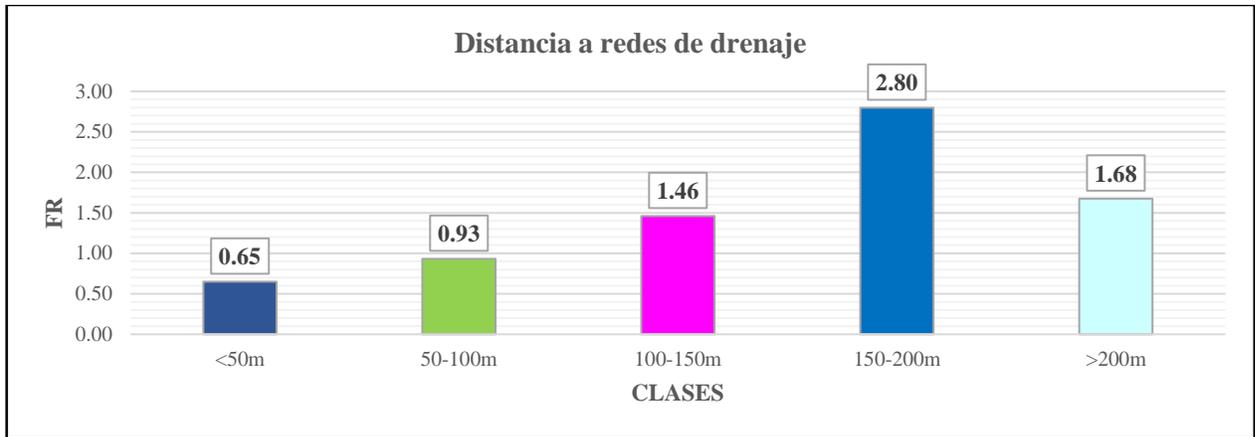


Figura 4.15: Diagrama de Clases vs FR del parámetro distancia a redes de drenaje. Elaboración propia.

El parámetro más importante en la distancia a redes de drenaje es el expresado en la clase más pequeña (< 50 m), ya que, ésta representa al cauce donde circulan las redes de drenaje, y por lo general, las áreas más susceptibles a remociones son las aledañas a estas redes de drenaje. Su valor FR de 0,65 es coherente al hecho de que no se crean estos fenómenos en el río, y al ir en aumento progresivo el FR de las demás clases, comenzando a bajar en > 200 m, reafirma la coherencia de los datos de este parámetro.

4.2.7. Uso/cobertura de suelo

Las clases del uso/cobertura de suelo (Figura 4.16), mostraron los valores de FR mayores a 1 en dos clases, en los sectores de matorrales con un FR de 1,40, y en las áreas urbanas con un valor muy alto de 4,20.

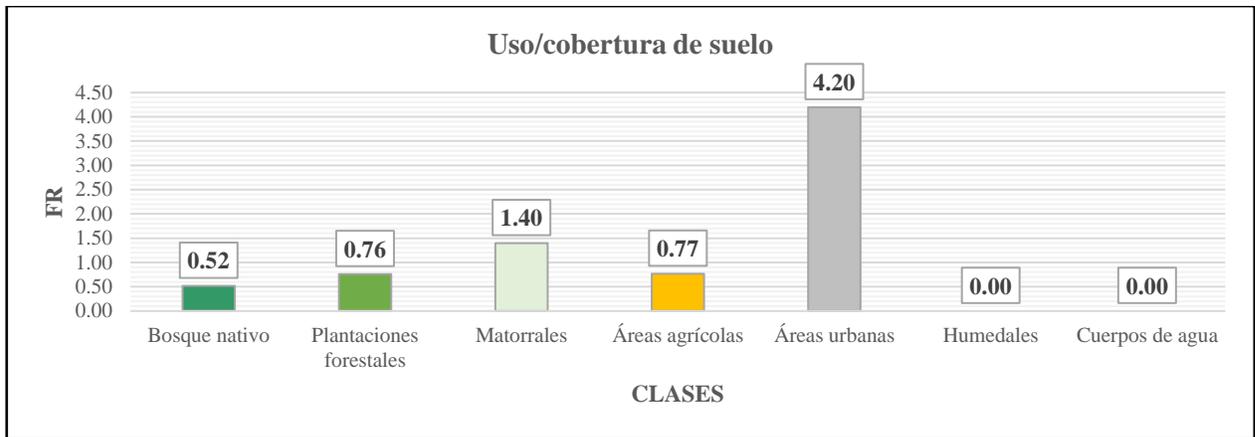


Figura 4.16: Diagrama de Clases vs FR del parámetro uso/cobertura de suelo. Elaboración propia.

Si analizamos el parámetro (Anexo III), se observa que existen más píxeles de remociones en masa en la clase de “plantaciones forestales” que en la de “áreas urbanas”, siendo de 82 (42,1%) y 42 (21,5%), respectivamente, lo que nos dice que, en el inventario, hay más puntos de escarpe de remociones en masa en sectores forestales que urbanos. Sin embargo, los píxeles de la clase de las plantaciones son 2.793.914 (55,3%), más que los del área urbana con 259.130 (5,1%), lo que hace que la estimación del FR en los sectores urbanos sea mucho más de lo que es en la realidad, y como el modelo FR distribuye los valores por toda la clase, y no únicamente por los sectores en los que existen puntos de remociones, provoca una sobreestimación y exageración del parámetro del área urbana en el mapa de susceptibilidad. Al comparar con trabajos que usaron la clase de áreas urbanas (Pradhan y Lee, 2010; Saadatkah y otros, 2015), no se presentaban estos problemas, por el hecho de que el área de estudio era más pequeña. Pero en general, gran parte de los trabajos de susceptibilidad de remociones, son en sectores donde no hay presencia de áreas urbanas en sus parámetros de suelo (Abedini y Tulabi, 2018; Acharya y Lee, 2019; Berhane y otros, 2020; Fayez y otros, 2018). Por esta razón, se decidió también crear mapas de susceptibilidad eliminando este parámetro.

4.2.8. Densidad de lineamientos/fallas

Los valores de debilidades estructurales cambiaban dependiendo del mapa. Por lo general, los valores con mayor densidad iban a ser aquellos en los que hubiera más fallas y lineamientos, lo que se cumple en nuestros modelos, ya que el mapa de densidad de fallas/lineamientos de Geología de Campo II, al ser el que poseía menor estructuras, solo alcanzó un máximo de 1,921 sq/km; por el

contrario, el mapa de densidad de fallas y lineamientos propios más los de Geología de Campo II alcanzó un valor máximo de 3,983 sq/km.

Las densidades de debilidades estructurales mostraron resultados diferentes entre cada mapa. No obstante, la similitud de estos tres mapas (Figura 4.8) es el hecho de que consideran a los sectores del cerro Caracol en el parque Ecuador, a las laderas en Chiguayante, y la zona entre Hualqui y Quilacoya como los sectores que poseían mayores densidades de fallas y/o lineamientos.

Los valores de FR perteneciente a la densidad de lineamientos creados manualmente para este trabajo (Figura 4.17), mostró una mayor influencia de remociones en masa en las clases con una densidad más baja. Lo anterior se presenta entre los 0,187 y los 0,925 sq/km, específicamente con la clase 0,187 – 0,450 sq/km con un valor de 1,90. La clase 0,450 – 0,687 sq/km desciende un poco este valor, con un FR de 1,44. Finalmente, la otra influencia mayor es de la clase 0,687 – 0,925 sq/km, con un FR de 1,16.

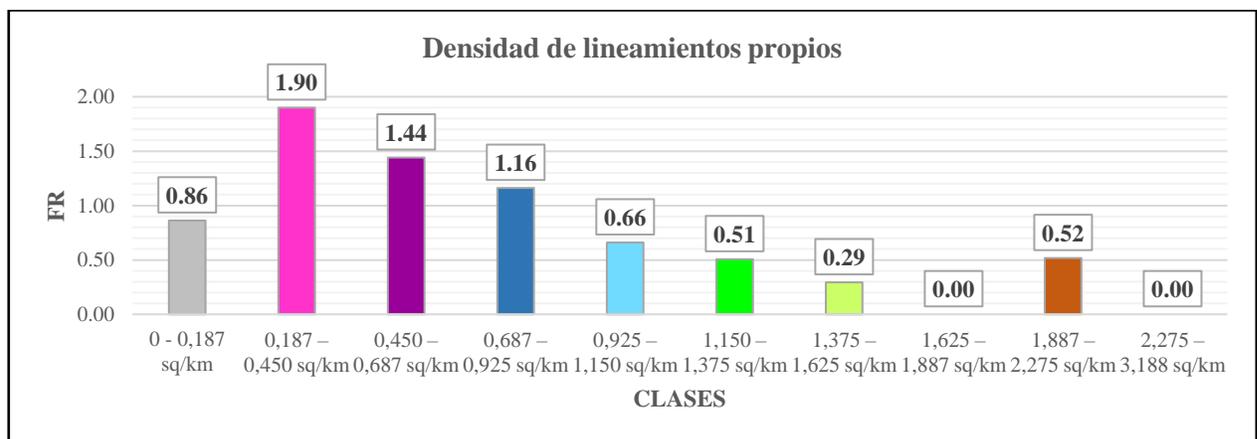


Figura 4.17: Diagrama de Clases vs FR del parámetro densidad de lineamientos propios. Elaboración propia.

Los problemas del mapa de densidad de lineamientos propios (Figura 4.8.a) radican en el hecho de que, la influencia mayor de susceptibilidad, medida por los valores de FR, se encuentra entre los 0,187 y 0,925 sq/km, lo que toma gran parte de los sectores de menor elevación, a la vez que ignora la influencia de los sectores más altos, con pendientes más empinadas, y donde hay mayor densidad de debilidades estructurales.

Los valores FR de las densidades de las fallas y lineamientos de Geología de Campo II (Figura 4.18) dieron que, casi todas sus clases, a excepción de la más pequeña de 0 – 0, 105 sq/km,

obtuvieron valores altos de FR, teniendo algunas clases valores de FR muy altos, como en la clase 1,122 – 1,348 sq/km (FR=7,26), y en la 1,597 – 1,921 sq/km (FR=6,70).

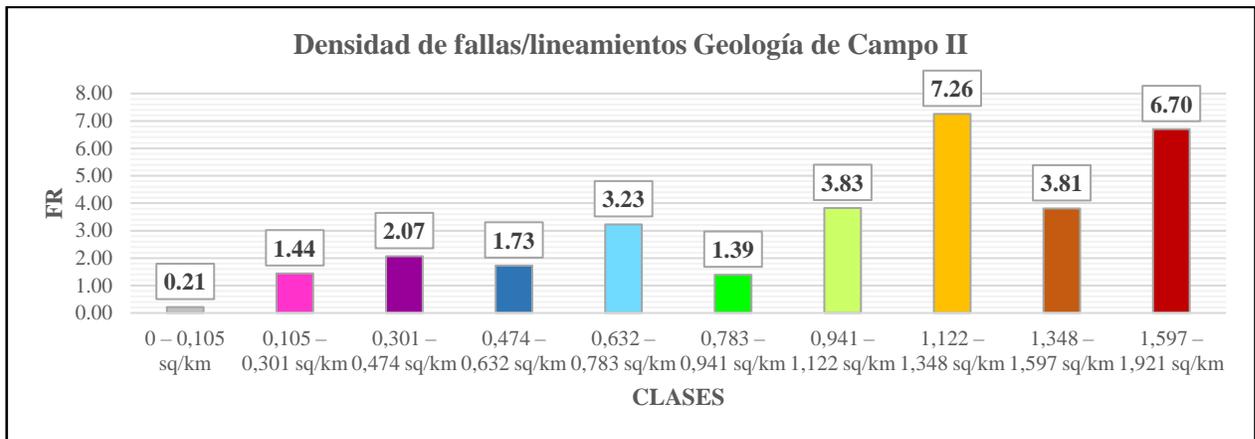


Figura 4.18: Diagrama de Clases vs FR del parámetro densidad de fallas/lineamientos Geología de Campo II. Elaboración propia.

El mapa de densidad de fallas/lineamientos de Geología de Campo II (Figura 4.8.b), posee la mayoría de sus estructuras en los sectores anteriormente mencionados, y como éstos poseen gran parte de los puntos de remociones en masa, todas las clases de este parámetro, exceptuando la clase más baja de 0 – 0,105 sq/km, tienen valores de FR sobre 1. No obstante, la desventaja radica en que no es un mapa demostrativo de toda el área de estudio, ya que sólo tiene datos de determinados sectores, pero no del área completa.

Finalmente, los resultados del FR del mapa de densidad de la unión de los lineamientos propios, y las fallas y lineamientos de Geología de Campo II (Figura 4.19), evidenció una repartición más equitativa de clases más estables, específicamente, las clases que mostraron mayor tendencia a la susceptibilidad fueron las siguientes: 0,671 – 0,952 sq/km (FR=1,15), 0,952 – 1,218 sq/km (FR=1,17), 1,218 – 1,499 sq/km (FR=1,03), 1,812 – 2,155 sq/km (FR=1,74), 2,155 – 2,577 sq/km (FR=1,33), y la clase 2,577 – 3,124 sq/km (FR=3,19).

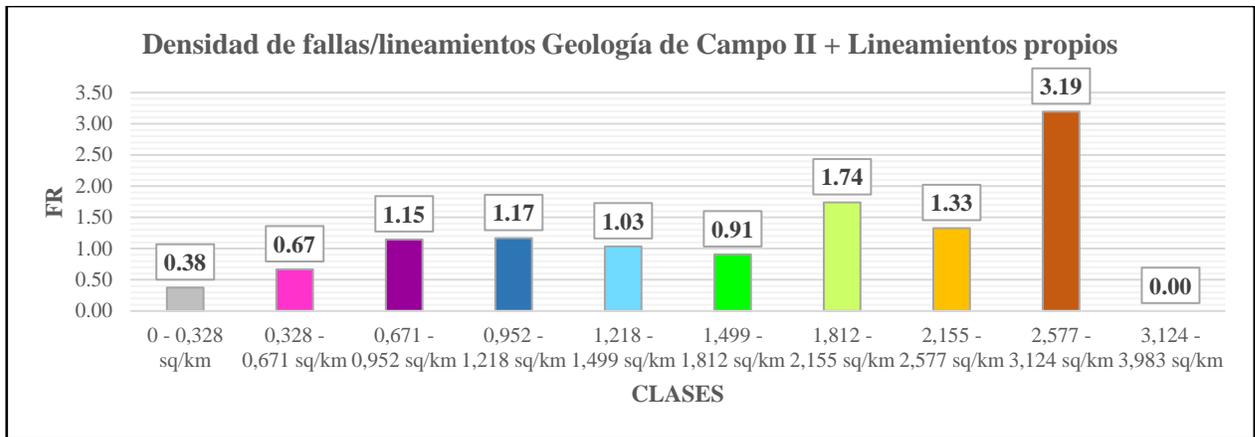


Figura 4.19: Diagrama de Clases vs FR del parámetro densidad de fallas/lineamientos Geología de Campo II + Lineamientos propios. Elaboración propia.

El mapa de densidad de fallas/lineamientos propios, más los de Geología de Campo II (Figura 4.8.c), muestra una similitud con los del primer mapa de debilidades estructurales; sin embargo, existe una mayor información de datos estructurales, los que caracterizan mejor a toda el área de estudio.

4.3. Mapas de susceptibilidad de RM

Con los valores normalizados enteros del RF (*Frequency Relative*, o frecuencia relativa) de cada clase, y el valor PR (*Prediction Rate*, o tasa de predicción) de cada parámetro condicionante, se puede dar paso a la creación de un mapa de susceptibilidad al calcular el LSI (*Landslide Susceptibility Index* o índice de susceptibilidad de remociones en masa). Para poner a prueba los parámetros usados, y posterior discusión del mejor modelo para representar la zonificación de la susceptibilidad del área de estudio, se crearon 6 mapas de susceptibilidad.

Como uno de los factores que apunta a evaluar este trabajo es la influencia de las estructuras en un mapa de susceptibilidad, el primer mapa creado (Figura 4.20.a) es uno que no considera ninguno de los mapas de densidad de fallas/lineamientos. Al observar una considerable sobreestimación de los valores del LSI en las áreas urbanas, evidenciadas también por el valor del FR de ésta, el segundo mapa (Figura 4.20.b) fue creado quitando la variable del uso/cobertura de suelo, lo cual se replicaría en la totalidad de mapas de susceptibilidad restantes; además, como aún se requiere un mapa base para comparar los otros mapas, que van a considerar la influencia de las estructuras en su creación, éste segundo mapa aún mantiene fuera a los parámetros estructurales.

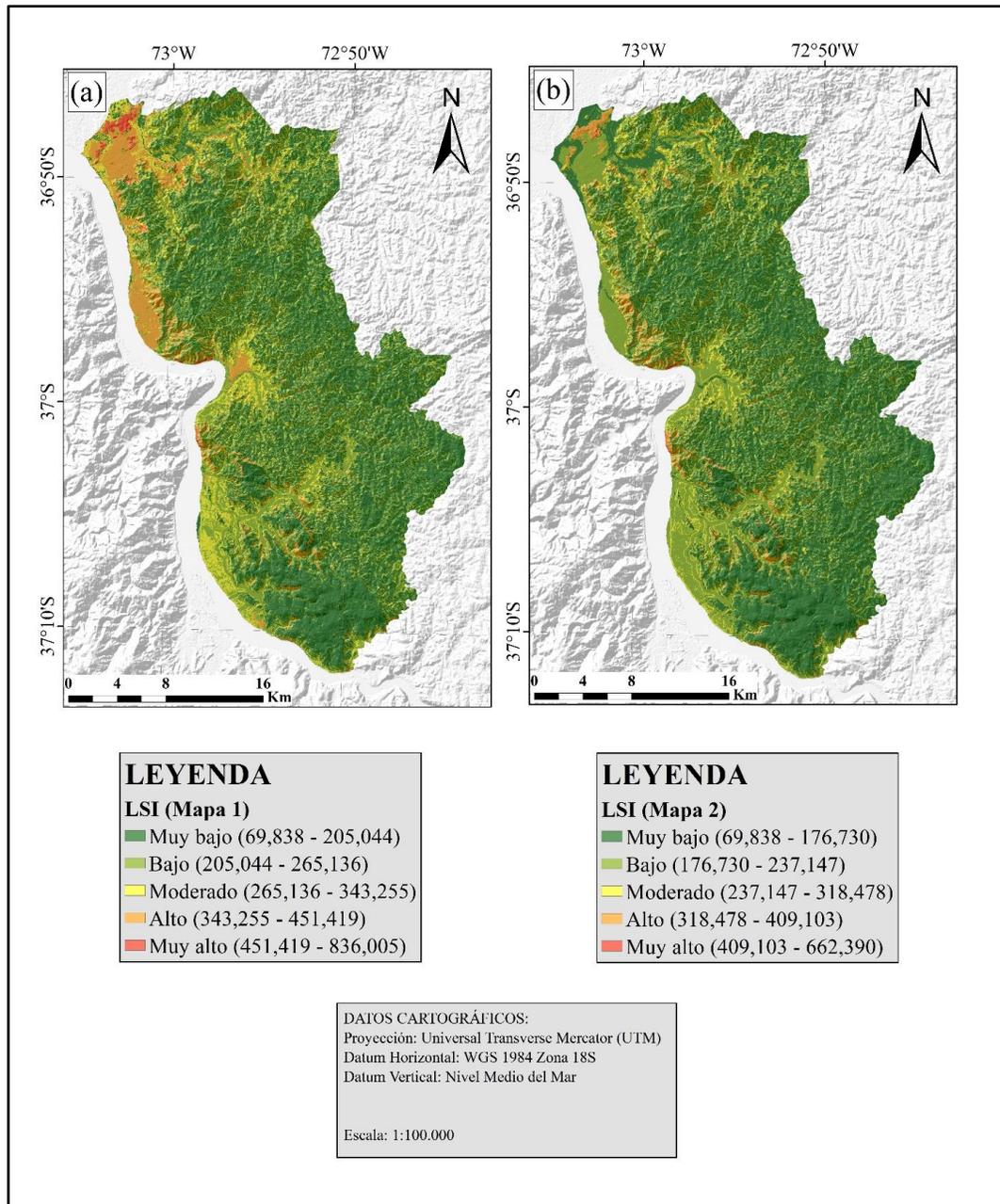


Figura 4.20: Primer y segundo mapa de susceptibilidad del área de estudio. (a) Mapa N°1, con parámetro uso/cobertura de suelo (b) Mapa N°2, sin uso/cobertura de suelo. Elaboración propia.

Ya teniendo los parámetros del segundo mapa de susceptibilidad como base, a partir del tercer mapa (Figura 4.21.a) fueron incorporados los mapas de densidad de fallas/lineamientos; específicamente, como el primer parámetro estructural es la densidad de los lineamientos propios, este mapa de densidad fue incorporado a la base de cálculo del LSI para el tercer mapa de

susceptibilidad. El segundo parámetro estructural, es la densidad de fallas/lineamientos de Geología de Campo II, por lo que, para el cuarto mapa de susceptibilidad (Figura 4.21.b), el mapa de densidad incorporado es el correspondiente a las fallas y lineamientos de Geología de Campo II.

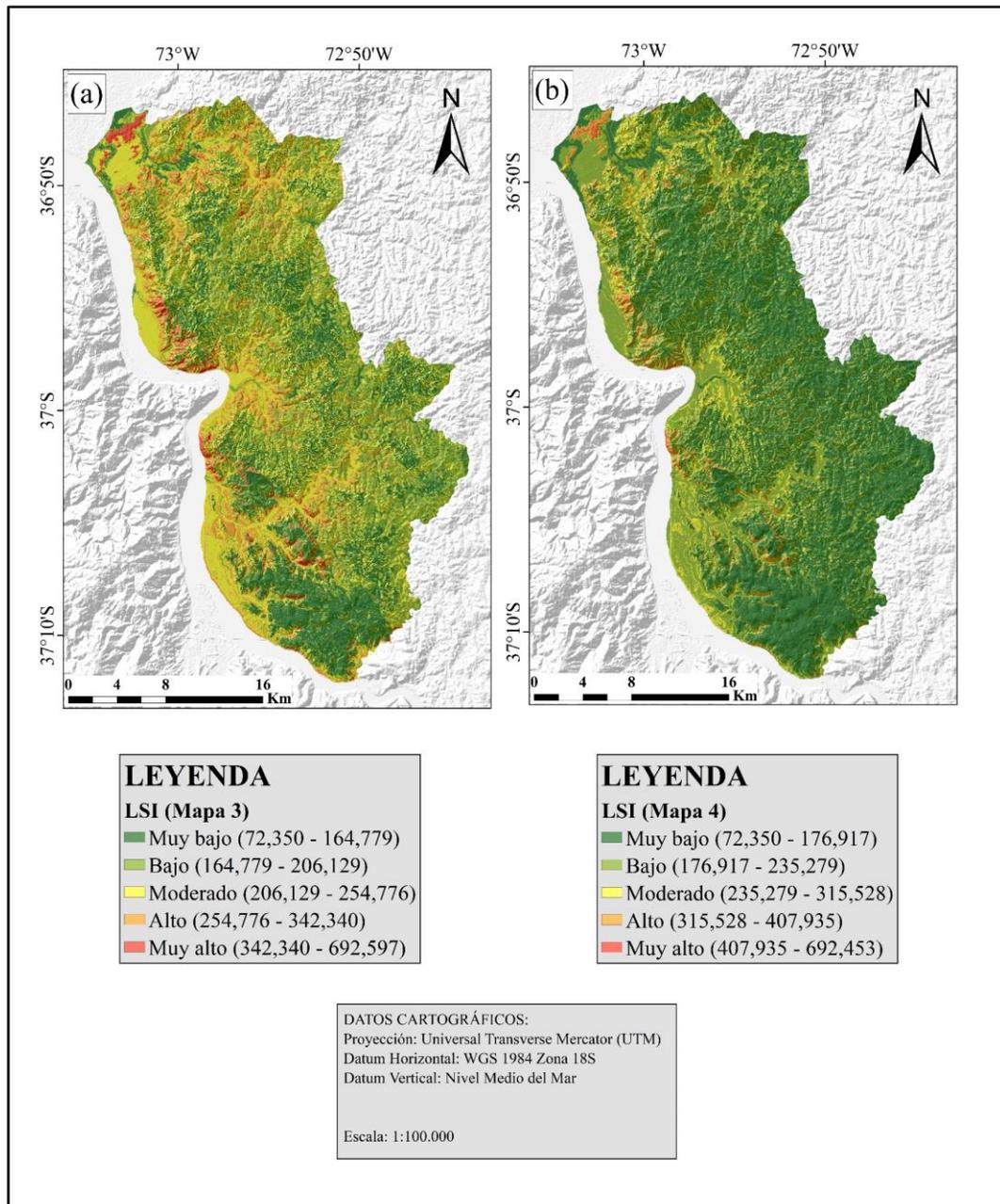


Figura 4.21: Tercer y cuarto mapa de susceptibilidad del área de estudio. (a) Mapa N°3. Contiene el parámetro de densidad de lineamientos propios. (b) Mapa N°4. Contiene el parámetro de densidad de fallas/lineamientos Geología de Campo II. Elaboración propia.

Con esto, solo falta la evaluación del último parámetro estructural de este estudio, por lo que, para el quinto mapa de susceptibilidad (Figura 4.22.a), es añadido el mapa de densidad de fallas/lineamientos del conjunto de lineamientos propios, y las fallas/lineamientos de Geología de Campo II. Como anteriormente, se observó una sobreestimación del valor de FR en la Formación Quiriquina (ver sección 4.2.5), es pertinente poder visualizar esto en un mapa de susceptibilidad, y poder ver en qué cambia con respecto a los mapas que ya fueron mostrados como resultados. Es por esto, que un sexto mapa de susceptibilidad (Figura 4.22.b) fue creado, con los mismos parámetros del quinto mapa, pero, con un mapa de los valores pertenecientes a la litología inicial. El uso de parámetros del quinto mapa en el sexto es porque, a simple vista, el segundo, cuarto, y quinto mapa de susceptibilidad presentan bastantes similitudes.

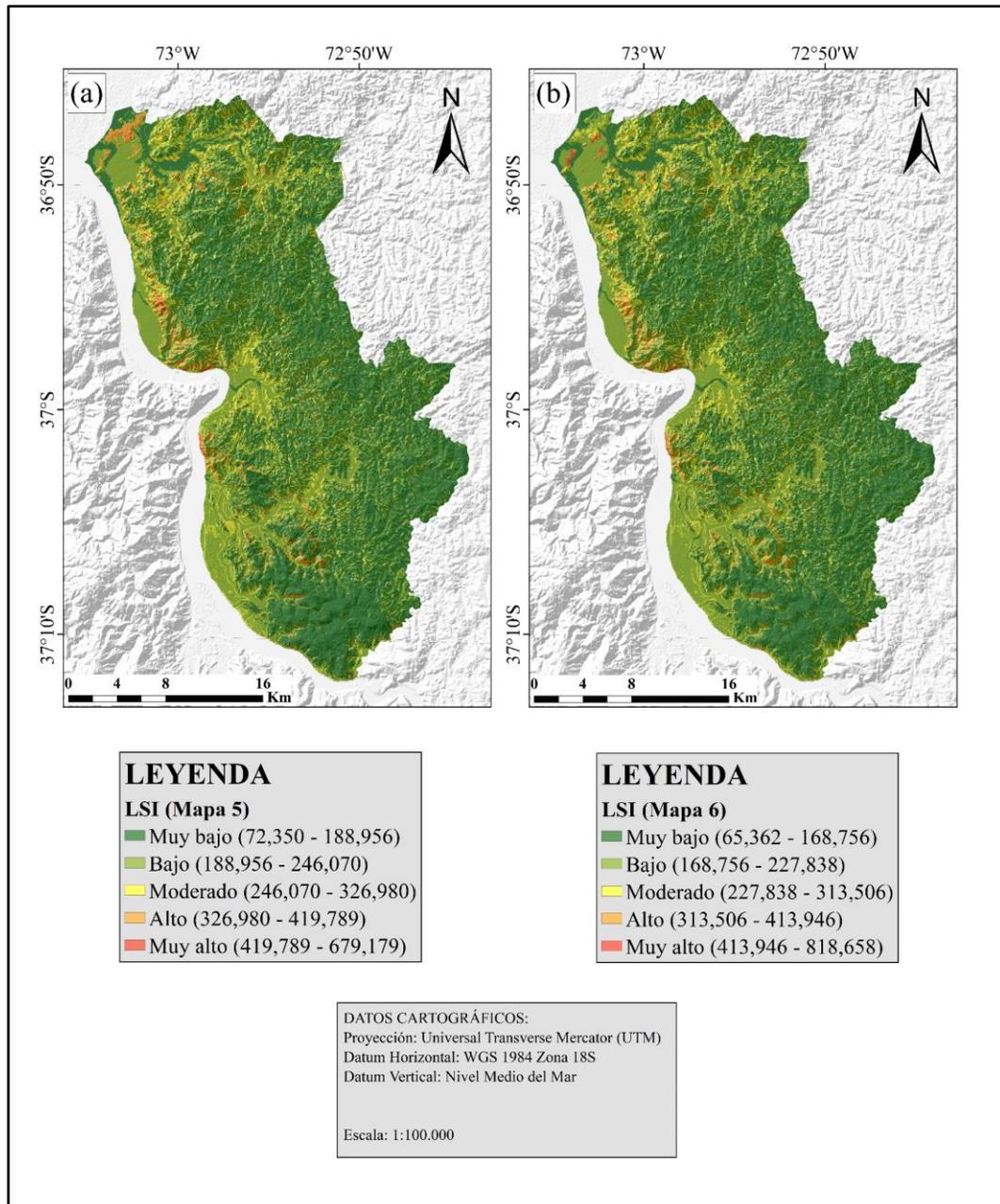


Figura 4.22: Quinto y sexto mapa de susceptibilidad del área de estudio. (a) Mapa N°5. Contiene el parámetro de densidad de fallas/lineamientos Geología de Campo II + lineamientos propios. (b) Mapa N°6. Contiene los mismos parámetros que el mapa N°5, con la diferencia de usar datos de la “litología inicial”, en vez de la “litología final usada”. Elaboración propia.

Con la justificación de la creación de cada uno de los mapas, se puede ordenar la información de cada uno de los parámetros de los mapas, y visualizar de mejor manera cuáles están incluidos en cada uno, y cuales son excluidos, como se muestra en la tabla 4.2.

Tabla 4.2: Distribución de los factores de cada mapa de susceptibilidad. Verde: el factor fue incluido en la creación del mapa. Rojo: el factor no fue incluido. Elaboración propia

	Mapa N°1	Mapa N°2	Mapa N°3	Mapa N°4	Mapa N°5	Mapa N°6
Grado de la pendiente	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Orientación de la pendiente	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Elevación	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Curvatura	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Litología inicial	Rojo	Rojo	Rojo	Rojo	Rojo	Verde
Litología final usada	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Rojo
Distancia a redes de drenaje	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Uso/cobertura de suelo	Verde	Rojo	Rojo	Rojo	Rojo	Rojo
Densidad de lineamientos propios	Rojo	Rojo	Verde	Rojo	Rojo	Rojo
Densidad de fallas/lineamientos Geología de Campo II	Rojo	Rojo	Rojo	Verde	Rojo	Rojo
Densidad de fallas/lineamientos Geología de Campo II + Lineamientos propios	Rojo	Rojo	Rojo	Rojo	Verde	Verde

Una descripción y análisis más detallado de cada mapa se muestran a continuación:

- Mapa N°1: este mapa de susceptibilidad (Figura 4.20.a) es el único que posee, dentro de las variables del cálculo del LSI, el parámetro de uso/cobertura de suelo (Tabla 4.2). La particularidad que presenta es el índice de susceptibilidad alto en la clase de áreas urbanas, y muy alto en los cerros de Concepción. Presenta índices principalmente moderados, como también algunos altos y muy altos, en los bordes del cerro Caracol, en los cerros cercanos a la ciudad de Chiguayante, como en localidades de la comuna del sector este de la comuna de Concepción. Posee un LSI de alto a muy alto, en la Avenida Manuel Rodríguez, que conecta las comunas de Chiguayante y Hualqui; además, también lo posee en la ruta que lleva a Quilacoya, en la comuna de Hualqui. Los porcentajes de las clases del LSI son las siguientes: muy bajo (47,32%), bajo (34,47%), moderado (9,79%), alto (7,38%), y muy alto (1,04%).

- Mapa N°2: para este mapa (Figura 4.20.b) en adelante, el parámetro de uso/cobertura de suelo queda desechado (Tabla 4.2), al ejercer una estimación fuera de la realidad de la susceptibilidad de las áreas urbanas. Como este mapa no posee parámetros estructurales, y muestra resultados cercanos a la realidad, es considerado un mapa base de comparación, con respecto a los mapas que se describen más adelante. Caracteriza, entre índices de susceptibilidad moderados a altos, a los cerros de Concepción, con ciertas zonas donde el LSI es muy alto. También, caracteriza con un LSI de moderado a alto, predominando el índice moderado, a las laderas del cerro Caracol, a los cerros cercanos al río Andalién, laderas cercanas a la ruta 146 y Avenida Manuel Rodríguez, y a las zonas de Chiguayante donde están las laderas del cerro, como también a poblados y rutas internas en Hualqui. Al igual que en el mapa N°1, posee índices altos a muy altos en la Avenida Manuel Rodríguez, y en la ruta por la que se accede a la localidad de Quilacoya. Las zonas forestales, en su mayoría, están caracterizadas por un LSI muy bajo a bajo, al igual que las ciudades y poblados. Los porcentajes de las clases del LSI son los siguientes: muy bajo (52,97%), bajo (37,05%), moderado (5,71%), alto (3,62%), y muy alto (0,64%).

- Mapa N°3: este mapa (Figura 4.21.a), además de tener los parámetros del mapa N°2, se suma la variable de la densidad de lineamientos propios (Tabla 4.2). Acá, se mantienen los lugares con índices de moderados a muy altos del mapa N°2, sin embargo, en algunos de estos sectores hay un aumento de sus índices. El rasgo más particular, es que los sectores de ciudad y poblados poseen un LSI moderado, al igual que sectores de flujo de ríos, evidenciado por la coloración que adquieren

zonas del río Andalién. Además, zonas forestales adquieren un índice moderado, en vez de uno muy bajo a bajo. Los porcentajes de las clases del LSI son las siguientes: muy bajo (25,05%), bajo (30,17%), moderado (31,28%), alto (9,18), y muy alto (4,32%).

- Mapa N°4: para este mapa de susceptibilidad (Figura 4.21.b), al igual que en el mapa N°3, se suma una variable estructural. En este caso, es la densidad de fallas/lineamientos de Geología de Campo II (Tabla 4.2). Aquí, se aprecia la influencia de las estructuras en los sectores en donde están marcadas, ya que el mapa posee similitudes con el mapa N°2, con respecto a los sectores con LSI de moderados a muy altos, pero hay un leve aumento de los índices moderados y muy altos, sobre todo en algunas zonas forestales. Los porcentajes de las clases del LSI son los siguientes: muy bajo (51,08%), bajo (36,55%), moderado (7,94%), alto (3,56%), y muy alto (0,87%).

- Mapa N°5: la variable estructural utilizada en este mapa (Figura 4.22.a), es la densidad de fallas/lineamientos de Geología de Campo II, sumado con los lineamientos propios (Tabla 4.2). El mapa N°5, a grandes rasgos, es similar al mapa N°4, ya que muestra casi los mismos índices de susceptibilidad en las zonas más susceptibles. La única diferencia radica en la pequeña distribución, de los índices de moderado a muy alto, de zonas específicas. Los porcentajes de los índices de susceptibilidad son los siguientes: muy bajo (52,40%), bajo (35,51%), moderado (7,72%), alto (3,56%), y muy alto (0,81%). El análisis de los porcentajes de las clases de este mapa, al compararlos con los del mapa N°4, reafirma que la diferencia entre estos dos es muy poca.

- Mapa N°6: para poder visualizar la sobreestimación original de la Formación Quiriquina en la litología, en el mapa N°6 (Figura 4.22.b) fueron usados los mismos parámetros que el mapa N°5, pero el parámetro "litología final usada", que une las formaciones Quiriquina y Curanilahue, fue reemplazado por la "litología inicial" (Tabla 4.2), la cual mantiene separadas a estas formaciones. La característica más notoria es el cambio en los cerros que contienen a la Formación Quiriquina, cambiando a un índice de muy alta susceptibilidad, además de disminuir el LSI de los sectores en donde está presente la Formación Curanilahue. Otros detalles menores, en comparación al mapa N°5, es la disminución de algunas zonas con índice de susceptibilidad muy alto, sobre todo en la comuna de Chiguayante. Los porcentajes de los índices de susceptibilidad son los siguientes: muy bajo (51,21%), bajo (38,04%), moderado (6,83%), alto (3,26%), y muy alto (0,66%).

El análisis de los mapas permite obtener algunas características generales entre ellos:

- Las zonas que poseen mayor LSI, son en las laderas de los cerros, sobre todo del cerro Caracol, laderas de cerros en Chiguayante, sectores cercanos al río Andalién y a la ruta 146, la ruta que une las comunas de Chiguayante y Hualqui (Avenida Manuel Rodríguez), zonas cercanas a poblados y rutas en Hualqui, como también en los cerros isla de Concepción.
- Uno de los sectores con menor LSI, son los correspondientes a las ciudades principales de las comunas, con excepción de las zonas cercanas a laderas. Los otros son las zonas forestales, y los lechos de ríos, este último por el comportamiento que evidencia el cauce del río Andalién, no así los sectores aledaños a éste, que presentan índices de susceptibilidad de moderados en adelante.
- A pesar de que algunos mapas presentan varianzas más notorias, como los mapas N°1 (Figura 4.20.a) y N°3 (Figura 4.21.a) en las áreas urbanas de ciudades, los 6 mantienen, en su mayoría, las mismas zonas que son caracterizadas por índices de susceptibilidad de moderados a muy altos. Ejemplo de esto es, que todos los mapas caracterizan con cierto índice, de moderado a muy alto, a los bordes del cerro Caracol, laderas cercanas a la ruta 146 y al río Andalién, cerros cercanos a la ciudad de Chiguayante, el sector que conecta Chiguayante y Hualqui por la Avenida Manuel Rodríguez, la ruta que permite llegar a Quilacoya, inclusive cerca del sector de Gomero.
- El mapa N°2 funciona como mapa base de inicio. Esto es debido a que, los mapas N°4, 5 y 6, creados después del N°2, son muy similares.

4.4. Validación de mapas por método AUC

Para los 6 mapas de susceptibilidad creados con anterioridad, se calculó el valor del AUC con su respectivo gráfico ROC, usando el set de puntos de entrenamiento del inventario de remociones en masa para calcular la tasa de éxito del modelo, y también usando el set de puntos de prueba para medir la tasa de predicción del modelo. Los resultados del AUC para cada mapa, además de su gráfico ROC correspondiente, son mostrados en las figuras 4.23 y 4.24.

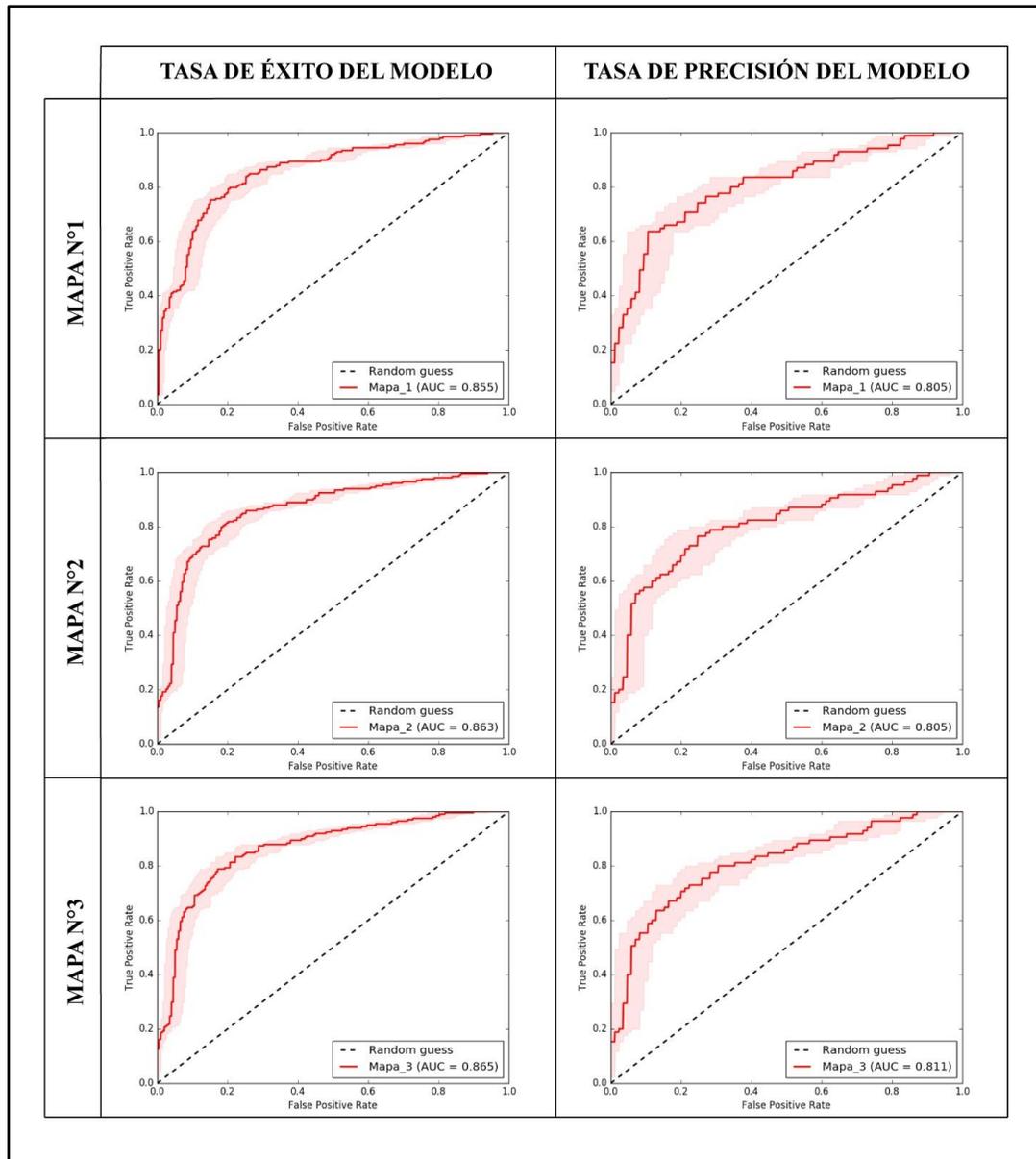


Figura 4.23: Diagramas ROC y AUC de la tasa de éxito y predicción para los mapas N°1, 2 y 3. Elaboración propia en base a resultados obtenidos en ArcSDM.

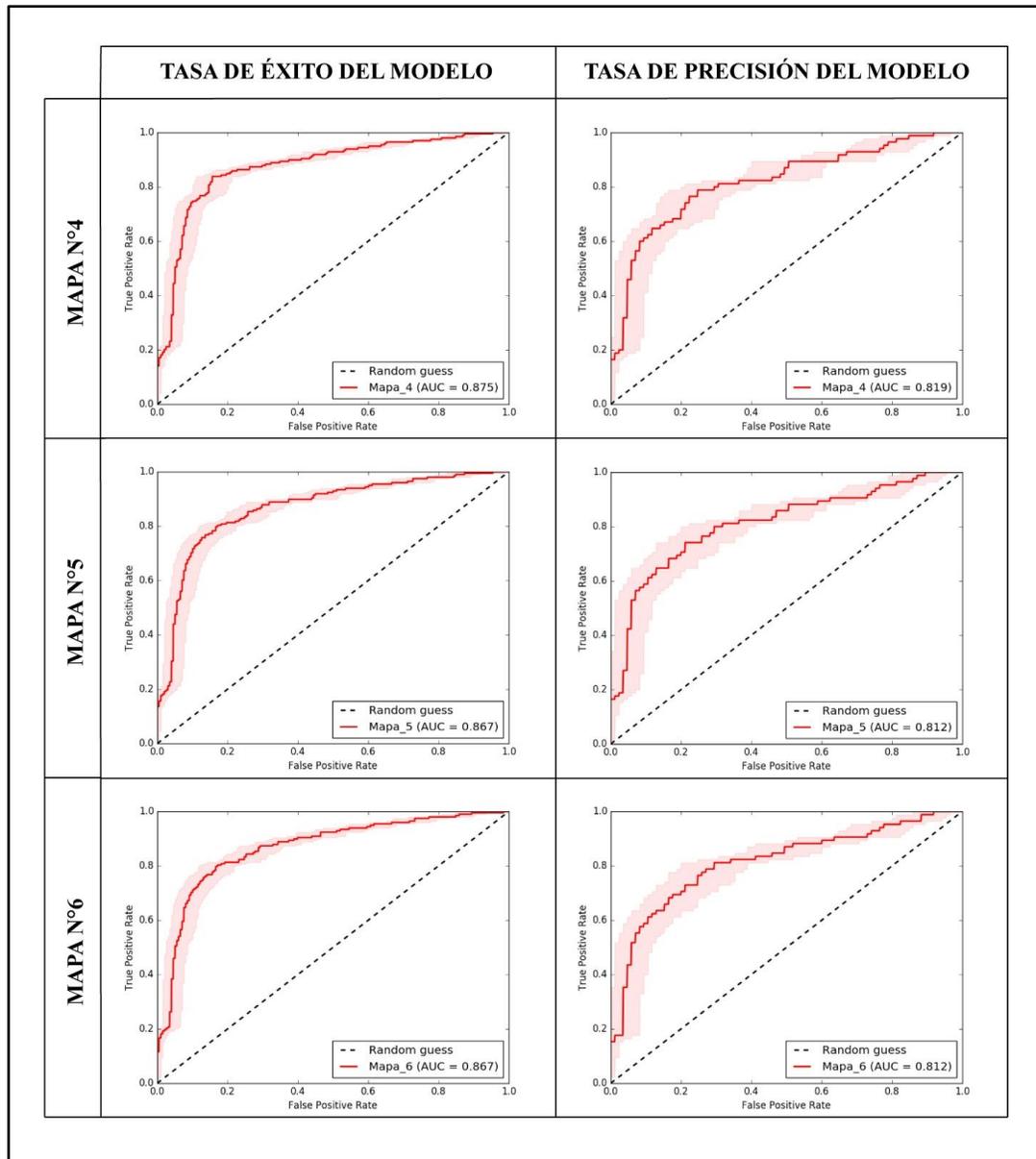


Figura 4.24: Diagramas ROC y AUC de la tasa de éxito y predicción para los mapas N°4, 5 y 6. Elaboración propia en base a resultados obtenidos en ArcSDM.

Los valores del AUC de la tasa de éxito van entre 0,855 y 0,875, mientras que los valores de la tasa de predicción van desde los 0,805 y 0,819, por lo que, según la clasificación del número AUC, los resultados son interpretados como “Muy bueno”.

Este resultado demuestra la validez de cada mapa de susceptibilidad. Se observa, por análisis de los valores del AUC tanto de la tasa de éxito, como de la tasa de precisión de los 6 mapas, que la

diferencia entre los mapas es por centésimas y milésimas, lo que se observa más claramente en la tabla 4.3. La variabilidad de estos valores no significa una diferencia abrupta entre ellos, ya que todos entran dentro del mismo rango de clasificación.

Tabla 4.3: Valores del AUC de cada mapa de susceptibilidad. Elaboración propia.

	AUC (Tasa de éxito del modelo)	AUC (Tasa de precisión del modelo)
Mapa N°1	0,855	0,805
Mapa N°2	0,863	0,805
Mapa N°3	0,865	0,811
Mapa N°4	0,875	0,819
Mapa N°5	0,867	0,812
Mapa N°6	0,867	0,812

El análisis para poder visualizar por qué un mapa tiene un valor de AUC más grande que otro, para este caso de valores muy similares, es el entrar en detalle de los píxeles de las áreas que cambian en el área de estudio. Todos los puntos del inventario de remociones en masa son los mismos para todos los mapas. Esto significa que, la existencia de una leve variación entre los valores AUC entre un mapa y otro, radica en el hecho de que, ciertas zonas que algunos puntos tocaban y que tenían un LSI que sí predecía un fenómeno de remoción en masa, en el otro mapa esas mismas zonas poseen un índice muy bajo a bajo. Por lo que, en cierto mapa, un punto se puede comportar como un verdadero positivo, y en otro, como un falso positivo, dependiendo del mapa de susceptibilidad.

Como se explicaba anteriormente (ver sección 4.3), los 6 mapas de susceptibilidad presentan áreas en común que poseen índices de susceptibilidad de moderados a altos, siendo la mayoría de estas zonas en donde están tanto los puntos de remociones en masa de entrenamiento (70% del inventario total), como los puntos de prueba (30% del inventario total). Otra característica que recordar es que, en varios mapas, la varianza de las zonas de LSI de moderados a altos es leve.

Estas razones explicarían gran parte del por qué los valores del AUC de los mapas de susceptibilidad, tanto para su tasa de éxito, como para su tasa de predicción, tienen una varianza muy leve, siendo prácticamente similares.

5. DISCUSIÓN

5.1. Mapa de susceptibilidad vs realidad

Al analizar los mapas de susceptibilidad creados en este trabajo, se observa una similitud casi exacta en los mapas N°2 (Figura 4.20.b), 4 (Figura 4.21.b) y 5 (Figura 4.22.a), presentando el mapa 6 (Figura 4.22.b) igualmente propiedades similares a los mapas anteriores, a excepción de los sectores donde afloran las formaciones Quiriquina y Curanilahue. A pesar de esto, y de los resultados que posteriormente nos entregue el método AUC, se hace importante la discriminación de cada mapa con respecto a la realidad. Esto puede hacerse mediante el uso de trabajos anteriores en la zona (Gajardo, 2022; Falcón y otros, 2010b), como también estimando que la zonación baja o alta de la susceptibilidad muestre valores incoherentes.

Para este estudio, se consideró algo incoherente o fuera de la realidad, como algo que carece de lógica o que arroje resultados exageradamente fuera de los esperados. Ejemplo de lo anterior son, que una ciudad entera esté caracterizada con un LSI alto, y no las zonas en las que sí puede haber susceptibilidad en ellas, como en las laderas de un cerro; que una ladera empinada, con material muy susceptible a desprenderse, y con presencia de lineamientos, esté dentro de las zonas de muy bajo a bajo índice de susceptibilidad; o que el cauce de un río tenga un índice de susceptibilidad de alto a muy alto.

Es en este contexto, en que el mapa N°1 (Figura 4.20.a) no es uno que pueda caracterizar de manera real la zonación de susceptibilidades de remociones en masa, debido a que la totalidad de las zonas urbanas está caracterizada con un valor alto de susceptibilidad. Al analizar el parámetro uso/cobertura de suelo, la clase específica de “áreas urbanas” posee un FR de 4,19 (Figura 4.16), lo que es explicado debido a que existen escarpes y zonas de material deslizado de remociones que llegan al sector urbano, los cuales son registrados como puntos del inventario, pero como el área de esta clase es relativamente pequeña, correspondiendo a un 5,13% del área total, va a haber una sobreestimación y mayor peso que otras áreas que poseen mayor cantidad de estos fenómenos, pero su área es más grande. Con el método FR, en este caso, si ocurren fenómenos que impacten al sector urbano, el método distribuye esta influencia por toda la clase del área urbana, coloreándolas de naranja, lo cual no es el resultado esperado, al haber sectores que ni siquiera tienen posibilidad de ser afectados por alguna remoción en masa. Por estas razones, el mapa N°1 falla en reflejar las

condiciones reales del área de estudio, y el parámetro “uso/cobertura de suelo” no es uno adecuado para usar en este estudio.

De igual manera, el mapa N°3 (Figura 4.21.a) no es uno que pueda ser usado para caracterizar las zonaciones de susceptibilidad en el área de estudio. Uno de los problemas es similar al del mapa N°1, al acá estar los sectores pertenecientes a ciudades con una coloración amarilla, indicando que poseen un índice de susceptibilidad moderado, una categoría menor a la del mapa N°1, pero que no deja de darle una categoría fuera de la naturaleza real a la totalidad de las ciudades. Sin embargo, el mayor problema de este mapa, y discriminante para considerarlo no apto para su uso, es que los sectores en donde circulan ríos son zonificados como de susceptibilidad moderada, lo cual es un error, debido a que lo esperable es que los sectores alledaños, o al costado de los flujos de un río, sean los que posean una categoría de una susceptibilidad moderada en adelante, pero no en los cauces menores de un río o afluente. Sumado a esto, la clase de las distancias a redes de drenaje que pertenece a los lechos del río, < 50 m, posee un FR de 0,65, lo que corresponde a un índice bajo de susceptibilidad, lo que no se refleja en este mapa.

Los mapas N°2 (Figura 4.20.b), 4 (Figura 4.21.b), 5 (Figura 4.22.a) y 6 (Figura 4.22.b) son los que muestran un mejor rendimiento que los dos mapas anteriores. Al visualizar los mapas en su conjunto, es observable que sus diferencias son mínimas, principalmente en las diferencias de zonaciones de los índices moderados en adelante. Las áreas de ciudades y poblados están clasificadas con índices de susceptibilidad muy bajo a bajo, observable por el color verde, a excepción de los sectores urbanos cercanos a laderas con grados de susceptibilidad más elevados, como en el caso de los cerros isla y el cerro Caracol en Concepción, y en cercanías de los cerros al este del sector urbano de la comuna de Chiguayante. Además, los lechos menores de los ríos son marcados con susceptibilidades muy bajas a bajas.

Las diferencias y elección del mapa final de susceptibilidad, es considerando aspectos menores del terreno, además del valor de los parámetros usados y su justificación de ser o no usados. Estas diferencias radican en lo siguiente: en el mapa N°2 (Figura 4.20.b), la zonificación hecha de las áreas de susceptibilidad moderada en adelante es inferior, tomando más áreas verdes en algunos lugares en los que sí es posible un mayor índice de susceptibilidad; de hecho, la totalidad de las áreas verdes (LSI muy bajo a bajo) en este mapa es de un 90,02%, lo que puede ser un problema al no predecir ciertas áreas en las que sí podría ocurrir un fenómeno de remociones en masa. El

mapa N°4 (Figura 4.21.b) muestra un aumento, reflejado por porcentajes, de las zonas con mayor susceptibilidad, todo gracias a la influencia de los valores estructurales, pudiendo observar aumentos en las susceptibilidades en sectores de Chiguayante, también en cercanías del cerro Caracol, en los costados de los lechos de redes de drenaje. Los cerros Lo Galindo y Chacabuco adquieren mayor coloración amarilla moderada, esto mismo igualmente se refleja en sectores de la comuna de Hualqui manteniendo sus zonas de alta y muy alta susceptibilidad prácticamente igual.

El mapa N°5 (Figura 4.21.a) es casi igual al mapa N°4, siendo demostrado por la similitud en los porcentajes de sus clases de LSI. Sus diferencias radican en el cambio de distribución de las susceptibilidades moderadas en adelante en ciertos sectores, aunque son sectores muy específicos, y los cambios son a una escala pequeña, siendo algunos ejemplos en el sector urbano en Chiguayante, el cerro Caracol, sectores aledaños al río Andalién, y en la comuna de Hualqui en la distribución de las zonas de susceptibilidad moderada. La gran diferencia en el mapa N°6 (Figura 4.22.b) es, como se indicó con anterioridad, la sobreestimación de la Formación Quiriquina, haciendo que los cerros isla en los que se encuentra esta litología estén marcados en el rango más alto de susceptibilidad, sin ninguna variabilidad, y entrando en detalle, elimina ciertas áreas de muy alta susceptibilidad en Chiguayante.

5.2. Valores AUC

La estimación del AUC es el análisis final antes de la selección del mapa final. Los cálculos AUC de la tasa de éxito, como de la tasa de predicción del modelo, dieron como resultados valores entre 0,8 y 0,9, indicando una tasa de “muy bueno”, siendo pequeña la variación del valor de AUC, de centésimas y milésimas.

Efectivamente, el modelo AUC muestra la alta validez que poseen los mapas N°2 (Figura 4.20.b), 4 (Figura 4.21.b), 5 (Figura 4.22.a) y 6 (Figura 4.22.b) para ser usados como mapa de susceptibilidad, lo que concuerda con la alta similitud que poseen los cuatro mapas, siendo las diferencias en su elección los valores detrás de la creación de cada modelo.

Las limitaciones del modelo AUC se pueden observar al ver los valores de los mapas N°1 (Figura 4.20.a) y 3 (Figura 4.21.a). Estos mapas mostraron tener valores altos de AUC, a pesar de no ser mapas válidos para demostrar correctamente la realidad de susceptibilidad de una zona. La razón detrás de esto es porque, si comparamos estos mapas con el resto, los sectores de índice de

susceptibilidad moderado a alto del resto de mapas son replicados en los mapas N°1 y 3, a pesar de las diferencias de coloración de ciertos sectores específicos entre los mapas N°2, 4, 5 y 6. Por lo tanto, el modelo del AUC va a leer estos valores junto con los sets de puntos de remociones en masa de la misma manera que los mapas válidos, sin considerar los errores que tengan los mapas N°1 y 3.

El mapa N°2 (Figura 4.20.b) posee la limitante de no contar con las debilidades estructurales, lo que restringe la consideración de ciertas áreas más susceptibles. Al observar la variación de los valores mínimos y máximos del LSI de los mapas válidos, la diferencia es muy pequeña, a excepción del valor máximo del mapa N°6 (Figura 4.22.b). Esto hace considerar que las debilidades estructurales sí tengan un peso importante en la caracterización de ciertas zonas en donde la susceptibilidad es importante ser considerada, cosa que el mapa N°2 realiza a menor escala.

Lo que limita al mapa N°4 (Figura 4.21.b) es su falta de registro estructural, al no estar caracterizada toda el área de estudio con debilidades estructurales, a diferencia de los mapas N°3, 5 y 6. A pesar de esto, es el mapa que posee las tasas de éxito y predicción más altas, con 0,875 y 0,819, respectivamente. El mapa de densidad de debilidades estructurales de éste mapa considera la mayor cantidad de registros de fallas y lineamientos en las zonas del cerro Caracol y los cerros de Chiguayante, y al haber en esos sectores una gran cantidad de puntos de fenómenos, provoca que todas sus clases dentro del parámetro estructural tenga valores elevados de FR, no habiendo espacio para considerar ciertas zonas en las cuales el índice de la susceptibilidad sea menor, lo que el mapa N°4 hace en las zonas donde no hay registro, que es una gran parte del área de estudio, zona que sí posee debilidades estructurales.

El mapa N°5 (Figura 4.22.a) es el segundo que posee los valores de tasa de éxito y predicción más grandes, siendo de 0,867 y 0,812, respectivamente. La limitante del mapa N°4 acá desaparece, ya que se complementa el registro centralizado de las debilidades estructurales de los mapas de Geología de Campo II, con nuestros propios valores de lineamientos, los que abarcan la totalidad del área de estudio. El mapa N°6 (Figura 4.22.b) posee los mismos valores de AUC que el mapa N°5, pero esto se debió a que solamente hubo una variación en la división de una clase en dos, siendo la zonación prácticamente igual. Aun así, el mapa N°6 restringe la susceptibilidad muy alta a los sectores de los cerros isla en los que únicamente aflora la Formación Quiriquina, siendo la

que domina en la lectura de los parámetros de estudio, y no considerando el resto de las litologías dentro de estas unidades geomorfológicas.

Es con estas consideraciones, que la ejecución del muestreo de la zonificación de susceptibilidad de remociones en masa que posee el mapa N°5 (Figura 4.22.a), es la que más se ajusta al resultado final válido y apegado a la realidad para el área de estudio en su totalidad. A pesar de que ésta sea la que tenga los segundos valores más altos de AUC, éstos son considerados como “muy buenos”, y la diferencia con los más altos es de milésimas. Así, se describe al mapa N°5 como el mapa de susceptibilidad del área de estudio, mostrado en la figura 5.1.

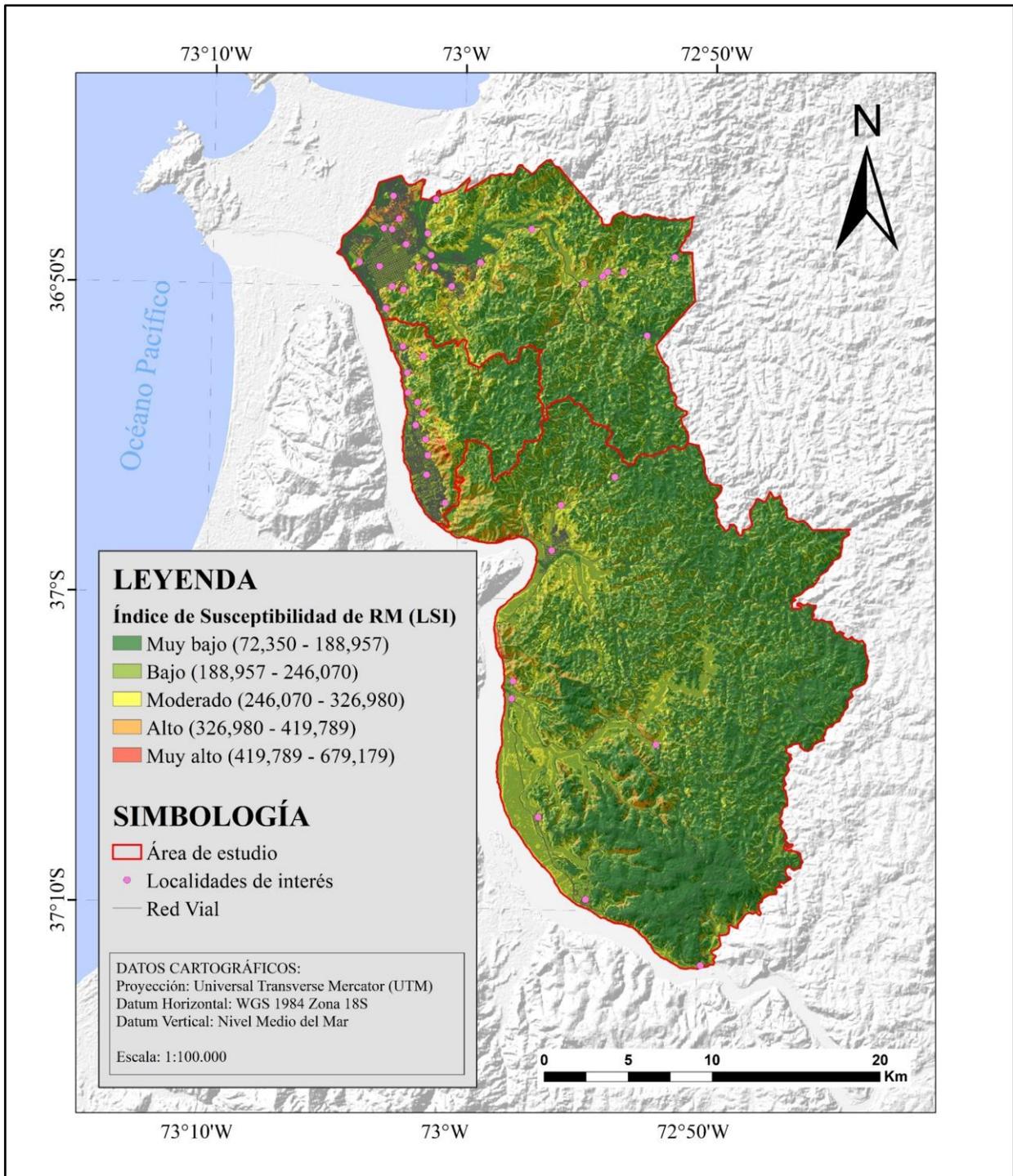


Figura 5.1: Mapa de susceptibilidad del área de estudio. Elaboración propia.

5.3. Análisis de susceptibilidad en sectores vulnerables

La elección de un modelo oficial y final para la zonificación de la susceptibilidad en el área de estudio va a permitir la visualización de los sectores y localidades en los que el estudio de susceptibilidad se vuelve importante. Para explicar lo anterior, fue ampliada la Figura 5.1, y se le colocaron los nombres a los puntos de las localidades de interés, como se puede apreciar en la Figura 5.2 para las comunas de Concepción y Chiguayante.

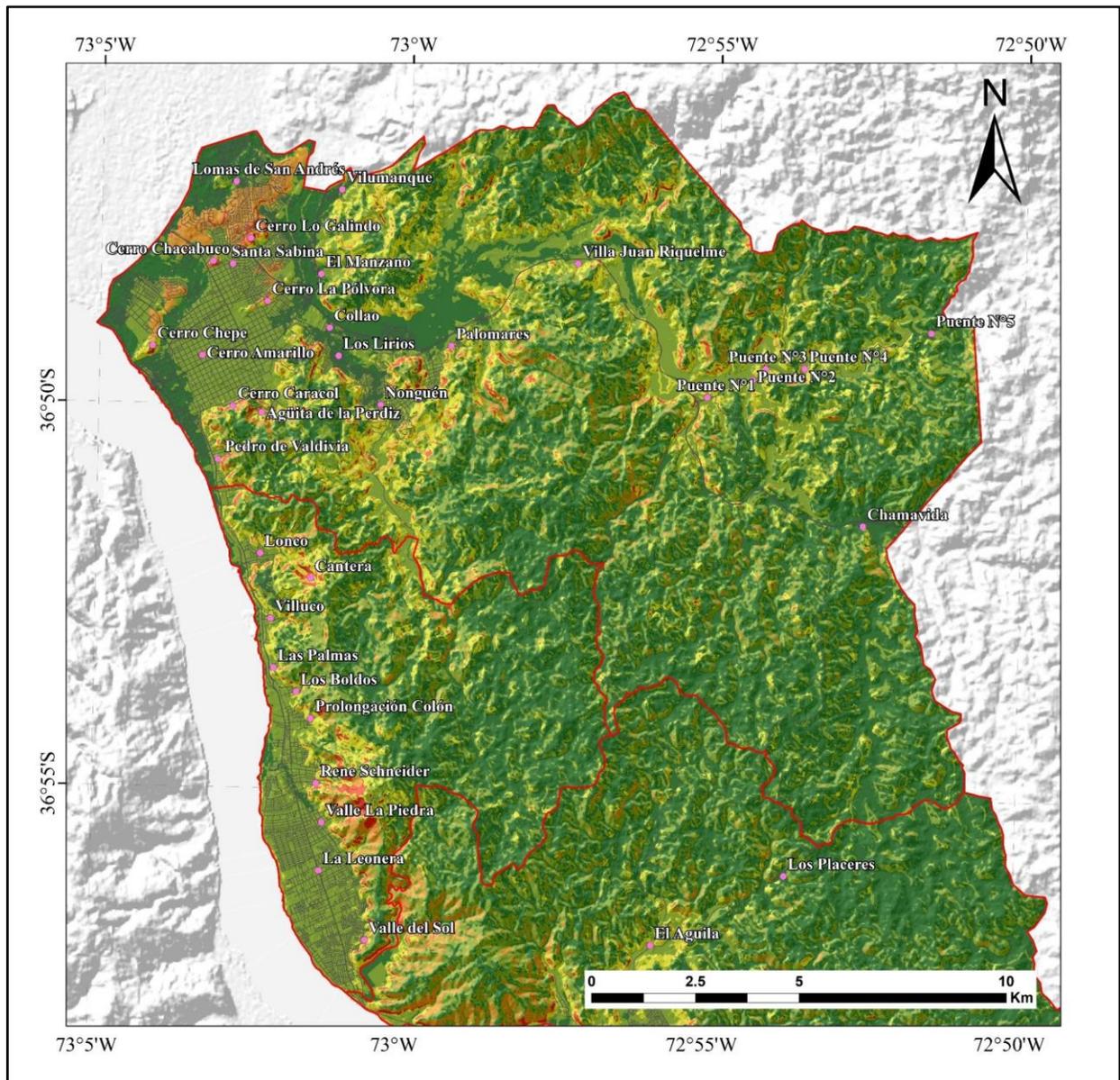


Figura 5.2: Mapa de susceptibilidad del área de estudio, ampliación en las comunas de Concepción y Chiguayante. Elaboración propia.

Visualizando la figura 5.2, de norte a sur, entre Vilumanque y El Manzano hay sectores con moderada susceptibilidad, lo que se puede explicar por las altas pendientes que hay en estos sectores, incluso algunas siendo de sectores privados que se extienden hasta el inicio de la comuna de Penco. También se puede apreciar que cerca de los sectores de las Lomas de San Andrés, hay una estimación de niveles altos de susceptibilidad, lo cual en parte no es del todo correcto, y es debido a que estos sectores son de lomas, pero existe un alto flujo de actividad urbana y de camino pavimentado en la zona, siendo la estimación excesiva por el afloramiento de la Formación Curanilahue, además de que, como estamos en sectores de lomas, van a haber altas pendientes, las que el modelo FR discrimina como de alta susceptibilidad. Lo que sí se encuentra estimado de manera correcta son los índices de susceptibilidad en el cerro Lo Galindo, lo que concuerda con lo observado y registrado en terreno.

En el sector más céntrico de la comuna, los índices más altos son de los cerros isla, lo que concuerda con la calidad de las litologías que las conforman, la presencia de debilidades estructurales, y las altas pendientes que poseen, incluso dándole al cerro Amarillo un índice alto de susceptibilidad, al compartir características con los demás cerros. Los sectores que conllevan un índice de susceptibilidad mayor en el área son los que tienen relación con el cerro Caracol y sus cercanías, entre los que se incluyen los sectores del parque Ecuador, Pedro de Valdivia, y Agüita de la Perdiz, sectores que han sido documentados con remociones en masa en meses de invierno, y que cada cierto tiempo se reactivan algunos de estos movimientos, ocasionando un riesgo, ya que son sectores de áreas urbanas que se han visto afectadas, o pueden verse en algún futuro, además de que el cerro Caracol concentra gran cantidad de gente que sube por éste, ya sea por turismo, o por deporte.

Más al este, los sectores de Collao y Los Lirios presentan una baja susceptibilidad en general, a excepción de los lugares cercanos a las laderas. Esto mismo se replica en los sectores de Nonguén, Palomares y Villa Juan Fernández, aunque con ciertas diferencias, ya que Nonguén, si bien es un área grande, se encuentra dominada en sus alrededores de laderas, en las cuales han habido episodios de remociones en masa, muchas de ellas muy cercanas a casas del sector (Fotografía 5.1); Palomares y Villa Juan Fernández, por otra parte, son zonas con un nivel de urbanismo bajo, pero que prácticamente el nivel de susceptibilidad en gran parte de sus áreas es moderado, siendo un

problema para la ampliación de la demografía en esas zonas al estar las zonas seguras más restringidas.



Fotografía 5.1: Remoción en masa detrás del patio de una casa, sector Nonguén, Concepción. Tomada por Felipe Baltierra.

Más al este de la comuna, el modelo caracteriza los sectores aledaños al camino y a zonas de río como moderadas, lo que es apreciable en el camino desde el Puente N°1 al Puente N°5, sectores no vistos en terreno, observando en el mapa una posible extensión del índice de susceptibilidad fuera de la comuna.

En la comuna de Chiguayante, prácticamente todos los sectores al noreste de la ciudad presentan una susceptibilidad latente, que van desde los índices moderados hasta los muy altos. El sector de la Cantera presenta una susceptibilidad muy elevada, la que va descendiendo a moderada-alta al ir hacia el sureste y pasando por los sectores más inclinados de Villuco, Las Palmas, y Los Boldos. En Prolongación Colón, existe un índice de susceptibilidad que llega a niveles muy altos, lo cual fue apreciable en terreno al estar los sectores de calles con barro y flujos de agua provenientes de

los cerros, y pudiendo caracterizar la zona con un desencadenante humano. Más al sureste, la susceptibilidad se mantiene en niveles alarmantes, como lo que se observó en Rene Schneider, Valle La Piedra, y ciertas áreas de La Leonera, lo que es comprobado y registrado tanto en terreno, como también por registros de la zona. Naranjo y otros (2006a) registra deslizamientos y flujos de barro en el sector Valle la Piedra, además de flujos de maicillo en Calle Cochrane entre Rene Schneider y el Valle la Piedra.

Los niveles de susceptibilidad se mantienen moderados a altos en el límite de la comuna, pudiendo apreciarse en el Valle del Sol, para acentuarse mucho más en la ruta que une las comunas de Chiguayante y Hualqui (Figura 5.3). De hecho, ésta ruta fue testigo de un derrumbe en los inviernos de este año.

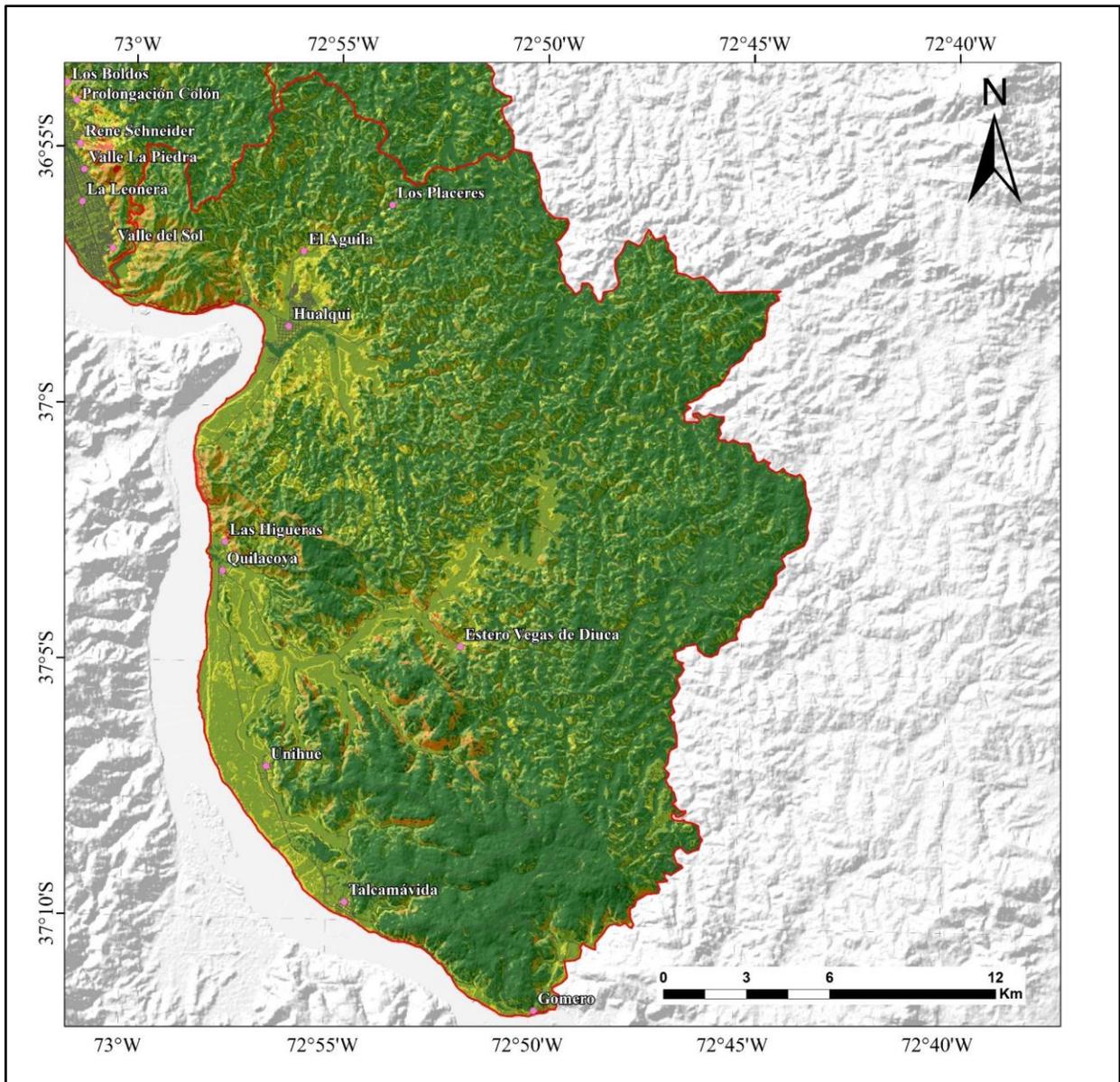


Figura 5.3: Mapa de susceptibilidad del área de estudio, ampliación en la comuna de Hualqui. Elaboración propia.

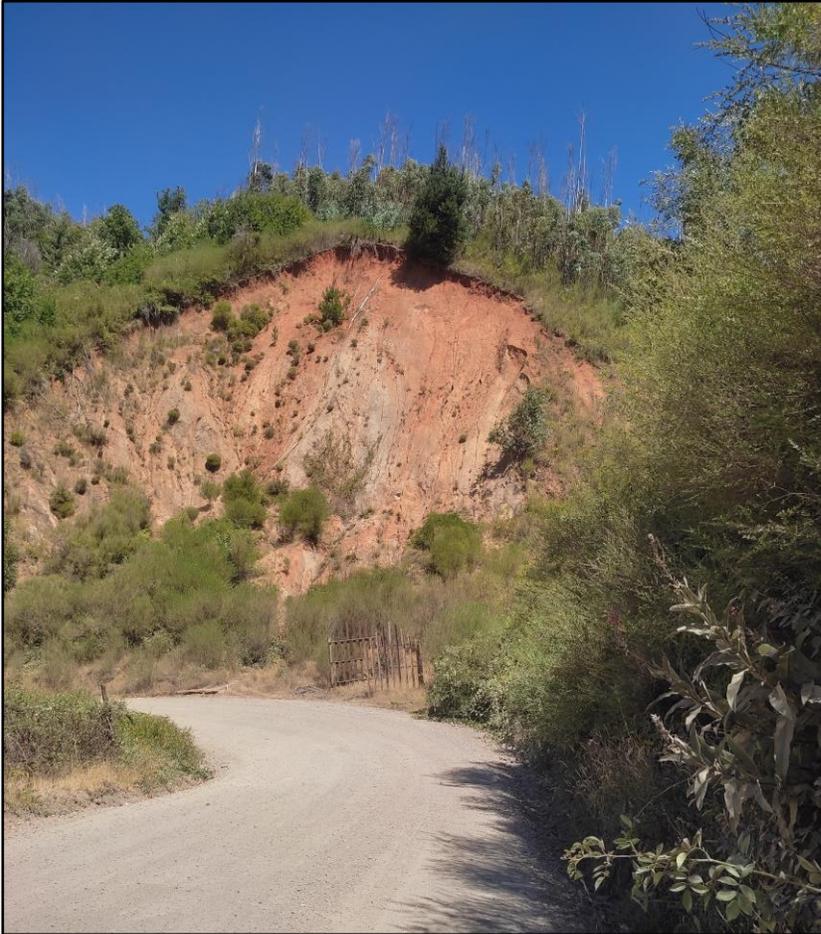
En la comuna de Hualqui, ocurre una relación directa entre los índices de susceptibilidad mostrados, y el nivel alto de vegetación que existe, ya que, los niveles moderados en adelante acá son muy escasos, pero igualmente existen. Uno de los más importantes es el que está en el acceso de la comuna desde Chiguayante, por la Avenida Manuel Rodríguez, el cual puede desencadenar un riesgo por su cercanía con la ruta automovilística. En la ciudad de Hualqui existe un nivel moderado de susceptibilidad hacia el noreste, y que se extiende hasta los alrededores de El Águila. La ruta que une Hualqui y Quilacoya, en los sectores de mayores pendientes, se produce un

incremento de la susceptibilidad hasta el sector de Las Higueras, como el mostrado en la fotografía 5.2.



Fotografía 5.2: Deslizamiento de tierra, cerca del sector Quilacoya, Hualqui. Tomada por Felipe Baltierra, en la ruta automovilística cercana a Las Higueras y Quilacoya.

En el resto de la comuna, el factor que controla la susceptibilidad es el de los grados de pendiente, ya que los sectores con susceptibilidades de moderadas a altas corresponden a los costados de caminos de tierra, característica confirmada en terreno; como los que poseen las áreas más empinadas por haber un flujo de agua, como los cercanos al Estero Vegas de Diuca, o los modificados artificialmente, como aparentemente se ve en el área entre Talcamávida y Gomero. También hay índices de susceptibilidad moderada en los sectores de caminos forestales, los cuales poseen altos grados de pendiente (Fotografía 5.3), además de cortes antrópicos, para la construcción de caminos de tierra.



Fotografía 5.3: Deslizamiento de tierra en pendiente, en camino forestal, Hualqui.
Tomada por Felipe Baltierra.

5.4. Planificación y futuro

Recordando, los mapas de susceptibilidad van a representar las áreas que poseen mayores probabilidades de que se desencadenen remociones en masa (Brabb, 1984). Con esto en mente, el mapa de susceptibilidad obtenido en este estudio (Figura 5.1), puede predecir las zonas y áreas en las comunas de Concepción, Chiguayante y Hualqui, en las cuales se pueden desencadenar remociones en masa, más allá de las zonas que ya poseen eventos que se han registrado en el tiempo.

Esto se hace útil, en el marco de la planificación territorial y las presiones demográficas, característica que, a nivel general, va en aumento (Schuster y Highland, 2007). Este crecimiento demográfico es, tanto en las ciudades principales, como en poblados y localidades. Este mismo crecimiento de la ciudad, muchas veces conlleva la construcción de edificaciones y viviendas en terrenos en los que las condiciones son totalmente desfavorables. Por ejemplo, gran parte de la

comuna de Concepción presenta llanuras aluviales, sectores de arenas, como también otros sectores de cerros con una meteorización muy grande. El construir en esas zonas se hace muy riesgoso, y es altamente desaconsejable. Sin embargo, mediante el mapa de susceptibilidad, podemos observar estas zonas, ya que el registro, en un área, de un índice de susceptibilidad de moderado a alto nos va a decir que, en esa zona, hay una acumulación importante de factores condicionantes que pueden propiciar remociones en masa. El estudio de susceptibilidad es importante, sobre todo en comunas como las estudiadas en este trabajo, que presentan altos registros de precipitaciones en las estaciones de otoño e invierno, las cuales siguen, en la actualidad, propiciando fenómenos de remociones en masa, que ponen en riesgo la seguridad y vida de la población. No solamente el estudio puede ser usado para planificación territorial futura en las comunas del AMC, sino que también permitirá delimitar ciertos sectores en los que transita población, para advertir de posibles fenómenos que ocurran en el sector; además de generar más conciencia acerca de las remociones en masa, informando a la ciudadanía, y advirtiéndola, sobre todo en los casos de poblaciones muy cercanas a zonas más susceptibles.

Una consideración que hay que tener, es que, un estudio mucho más focalizado a una sola comuna, o inclusive, a un solo sector de una comuna, puede ser mucho más exacto que el modelo que se presenta en este trabajo. La funcionalidad del *Frequency Ratio* es por medio de píxeles, los cuales, además de condicionar ciertas zonas, están condicionados por el tamaño y la cantidad de píxeles del área total, lo que se pudo comprobar, por ejemplo, con los errores encontrados en la lectura de datos FR de la Formación Quiriquina, como también en la clase del área urbana del factor de uso/cobertura de suelo. Aún así, el modelo de este trabajo hace una buena representación del área de estudio total.

Como los mapas de susceptibilidad son una herramienta para considerar en la planificación territorial, no se deben solamente restringir a nuestra área de estudio, si no que se pueden hacer estudios de la predicción de remociones en masa, en diversas zonas del país, para así ir contribuyendo a un buen plan de crecimiento demográfico, que no involucre la construcción de edificaciones en zonas susceptibles. Estas razones hacen que, los estudios de susceptibilidad sean altamente aconsejables.

Los mapas de susceptibilidad, incluyendo el presentado en este trabajo, pueden ser mejorados de varias maneras. Como para la creación del mapa, se usan mapas de factores condicionantes

topográficos, un Modelo de Elevación Digital (DEM) de alta resolución es ideal para obtener un mapa de buena calidad. También, un aspecto favorable es si el DEM es más reciente, ya que, representará el área de estudio actual, sin embargo, esto es muy difícil de conseguir de forma gratuita. Lo anterior se debe a que, las páginas web que ofrecen servicios gratuitos de imágenes satelitales, además de los DEM disponibles, son de satélites que ya han dejado de funcionar, muchas veces siendo el último registro hace varios años atrás. Otra manera de dar mejora al mapa de susceptibilidad es con un inventario más grande de puntos de remociones en masa. No hay un límite de puntos que se pueden usar en un estudio, por lo que, inventarios mucho más grandes de puntos van a caracterizar de mejor manera la totalidad de una zona estudiada, y algunas zonas de forma más específica.

6. CONCLUSIONES

Según lo presentado en este trabajo, se reafirma el hecho de que las comunas de Concepción, Chiguayante y Hualqui son, y están siendo afectadas por procesos de remociones en masa. A mayor escala, las zonas, tanto en los sectores poblados de cada comuna, que tienen un índice mayor de que existan fenómenos de remociones en masa, son las laderas de los cerros, presentando una distribución heterogénea de índices de susceptibilidad de moderados a muy altos. Esta mayor tasa de incidencia se debe a las características que condicionan su terreno, haciendo que el estudio de los factores condicionantes o naturales tomen gran importancia para un análisis general. Es esperable que estos análisis vayan de la mano junto a los factores desencadenantes más presentes en el área de estudio, como son las precipitaciones, y la sismicidad. Esto es debido a que, la limitante del modelo de susceptibilidad propuesto es que, solamente hace uso de una de las variables en cuestión, los factores condicionantes o naturales, por lo que, complementar esta información con los factores que desencadenan los fenómenos de remociones en masa, sobre todo en lo que respecta a las lluvias, permitirá un análisis más completo.

Si bien puede ser complementado, el modelo *Frequency Ratio* es válido para el modelamiento de las susceptibilidades de remociones en masa. La relación del inventario de remociones en masa, junto con los factores condicionantes, caracterizan tanto la variedad de clases de cada factor, como la clasificación de zonas de las cuales no se tiene un registro de remociones en masa, pero cuentan con las características para ser un sector por evaluar. Los rangos de susceptibilidad, dentro del área de estudio, adquieren una clasificación y distribución que permiten observar la influencia de los parámetros que ejercen un mayor control en los fenómenos de remociones en masa. Los parámetros que tuvieron un mejor comportamiento son, los grados de la pendiente, la litología, y la elevación, confirmando esto por los valores de FR de sus clases, los cuales reflejan la tendencia del desencadenamiento de remociones en masa en estas clases, y también es confirmado por su valor PR (*Prediction Rate*).

En cuanto al catálogo de remociones en masa, la ampliación y corrección de éste permitió ser una herramienta más completa, a la hora de ser usado. El inventario es importante para la caracterización de un área de estudio, por lo que un inventario con pocos puntos puede no caracterizar de la mejor manera a una zona tan extensa como nuestra área de estudio. Una

actualización y ampliación de su base de datos, proporciona una fuente de datos más sólida, permitiendo una zonación más precisa.

Lo que respecta a las debilidades estructurales, se confirma que proporcionan una mayor cantidad de información de los índices de susceptibilidad, ampliando los índices de susceptibilidad de zonas ya identificadas con éstos. Por esto, se recomienda que, si es factible, un estudio de debilidades estructurales sea realizado para el complemento de un mapa de susceptibilidad.

El método del AUC permite la validación eficaz de la evaluación de las tasas de éxito y predicción del mapa final. Sin embargo, se concluye que, este método tiene que ser usado cerciorándose de que el mapa que vayamos a analizar tenga un resultado apegado a la realidad. Aunque los modelos estadísticos son de gran ayuda para procesar datos de una manera rápida, no se debe dejar de lado el componente manual, sobre todo a la hora de revisar los resultados, para poder hacer un análisis tanto de lo que se esperaba obtener, como la revisión y arreglo posterior de los errores que se puedan encontrar en el modelo final.

Finalmente, los índices de susceptibilidad de remociones en masa, mostrados por el mapa de susceptibilidad del área de estudio, logran mostrar de manera clara las áreas en las que es más importante el estudio y ordenamiento territorial de las tres comunas en estudio. Por lo tanto, el mapa de susceptibilidad es una herramienta que hay que tener en cuenta si se quieren hacer obras de construcción en algún lugar, precaución, como también obras de mitigación de remociones en masa de ciertos sectores que, pueden no haber presentado evidencias de remociones en masa, pero cuentan con las características para desarrollarlas en un futuro. El trabajo en comunidad de habitantes que puedan ser afectados por estos fenómenos, con los geólogos que estudien cierta área, se hace importante y vital, ya que un mapa de susceptibilidad también es propenso a ser alterado si es que cambian ciertas condiciones topográficas en el tiempo, como si se presentan episodios nuevos de remociones en masa, por lo que el trabajo de evaluar la susceptibilidad de ciertas áreas tiene que ser continuo en el tiempo, y estar en constante actualización y monitoreo.

7. REFERENCIAS

- ABBAS, H.; HUSSAIN, D.; KHAN, G.; UL HASSAN, S.N.; KULSOOM, I. & HUSSAIN, S. 2021. Landslide inventory and landslide susceptibility mapping for China Pakistan Economic Corridor (CPEC)'s main route (Karakorum Highway). *Journal of Applied and Emerging Sciences*. Vol. **11** (1): 18 pp.
- ABEDINI, M. & TULABI, S. 2018. Assessing LNRF, FR, and AHP models in landslide susceptibility mapping index: a comparative study of Nojian watershed in Lorestan province, Iran. *Environmental Earth Sciences*. Vol. **77**: 1-13.
- ACHARYA, T.D. & LEE, D.H. 2019. Landslide Susceptibility Mapping using Relative Frequency and Predictor Rate along Araniko Highway. *KSCE Journal of Civil Engineering*. Vol. **23** (2): 763-776.
- ADDIS, A. 2023. GIS-Based Landslide Susceptibility Mapping Using Frequency Ratio and Shannon Entropy Models in Dejen District, Northwestern Ethiopia. *Journal of Engineering*. Vol **2023**: 14 pp.
- AGUIRRE, L.; HERVÉ, F. & GODOY, E. 1972. Distribution of metamorphics facies in Chile- an outline. *Krystalinikum*. Vol. **9**: 7-19.
- AKGUN, A.; DAG, S. & BULUT, F. 2008. Landslide susceptibility mapping for a landslide-prone area (Findikli, NE of Turkey) by likelihood-frequency ratio and weighted linear combination models. *Environmental Geology*. Vol. **54**: 1127-1143.
- ALCÁNTARA-AYALA, I. 2000. Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. *Investigaciones Geográficas*, N° **41**: 7-25.
- ALCÁNTARA-AYALA, I. 2002. Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology*. Vol. **47** (2-4): 107-124.
- ALKHASAWNEH, M.S.; NGAH, U.K.; TAY, L.T.; ISA, N.A.M. & AL-BATAH, M.S. 2013. Determination of Important Topographic Factors for Landslide Mapping Analysis Using MLP Network. *The Scientific World Journal*. Vol. **2023** (1): 12 pp.

- ANTEZANA, C.C. 2018. Evaluación de peligro de remociones en masa en el área de Cobquecura-Buchupureo, comuna de Cobquecura Región del Bio-Bio, Chile. Memoria para optar a título de Geóloga. Universidad Andrés Bello, Departamento de Geología (Inédito): 78 pp. Viña del Mar.
- BALDERMANN, A.; DIETZEL, M. & REINPRECHT, V. 2021. Chemical weathering and progressing alteration as possible controlling factors for creeping landslides. *Science of the Total Environment*. Vol. **778**: 13 pp.
- BERHANE, G.; KEBEDE, M.; ALFARAH, N.; HAGOS, E.; GRUM, B.; GIDAY, A. & ABERA, T. 2020. Landslide susceptibility zonation mapping using GIS-based frequency ratio model with multi-class spatial data-sets in the Adwa-Adigrat mountain chains, northern Ethiopia. *Journal of African Earth Sciences*. Vol. **164**: 15 pp.
- BHANDARI, B.P. & DHAKAL, S. 2018. Lithological Control on Landslide in the Babai Khola Watershed, Siwaliks Zone of Nepal. *American Journal of Earth Sciences*. Vol. **5** (3): 54-64.
- BIRÓ, L. 1982. Revisión y redefinición de los “Estratos de Quiriquina”, Campaniano-Maastrichtiano, en su localidad tipo, en la isla Quiriquina, 36°37' Lat. Sur, Chile, Sudamérica, con un perfil complementario en Cocholgüe. Congreso Geológico Chileno N° 3. Acta **1**: 29-64. Concepción.
- BÖRGEL, R. 1983. Tomo II: Geomorfología. Geografía de Chile, Instituto Geográfico Militar: 182 pp. Santiago.
- BRABB, E. 1984. Innovative Approaches for Landslide Hazard Evaluation. *Proceedings of 4th International Symposium on Landslides*. Vol. **1**: 307-324. Toronto.
- BROWN, J.L.; BENNETT, J.R. & FRENCH, C.M. 2017. SDMtoolbox 2.0: the next generation Python-based GIS toolkit for landscape genetic, biogeography and species distribution model analyses. *PeerJ*. Vol. **5**: 12 pp.
- BUATOIS, L.A. & ENCINAS, A. 2011. Ichnology, sequence stratigraphy and depositional evolution of an Upper Cretaceous rocky shoreline in central Chile: Bioerosion structures in a transgressed metamorphic basement. *Cretaceous Research*. Vol. **32** (2): 203-212.

- CASTILLO, M. 2021. Análisis de susceptibilidad frente a procesos de remoción en masa para la localidad de Cochölgue, Región del Biobío, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 76 pp. Concepción.
- ÇELLEK, S. 2020. Effect of the Slope Angle and Its Classification on Landslide. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*: 1-23.
- CHEN, H.; LIN, G.-W.; LU, M.-H.; SHIH, T.-Y.; HORNG, M.-J.; WU, S.-J. & CHUANG, B. 2011. Effects of topography, lithology, rainfall and earthquake on landslide and sediment discharge in mountain catchments of southeastern Taiwan. *Geomorphology*. Vol. **133** (3-4): 132-142.
- CHEN, T.; ACMA, F.M.; AMOROSO, V.B.; MEDECILO GUIANG, M.M. & HUANG, B. 2022. Distribution of climatic suitability of *Pellionia Scabra* benth. (Urticaceae) in China. *Applied Ecology & Environmental Research*. Vol. **20** (5): 10 pp.
- COROMINAS, J.; WESTEN, C. v.; FRATTINI, P.; CASCINI, L.; MALET, J.-P.; FOTOPOULOU, S.; CATANI, F.; EECKHAUT, M. v. d.; MAVROULI, O.; AGLIARDI, F.; PITILAKIS, K.; WINTER, M.G.; PASTOR, M.; FERLISI, S.; TOFANI, V.; HERVÁS, J. & SMITH, J.T. 2014. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. Vol. **73**: 209-263.
- 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 (Inédito): 149 pp. Concepción.
- CREIXELL, C.; CANCINO, G. & RAMÍREZ, P. 2010. Efectos geológicos del sismo del 27 de febrero de 2010: Observaciones de daños y evaluación de riesgos geológicos en la comuna de Concepción (INF-BIOBIO-47). Servicio Nacional de Geología y Minería: 12 pp. Santiago.
- CRISÓSTOMO, E. 2017. Metalogénesis asociada al magmatismo Carbonífero del centro sur de Chile. Universidad de Concepción, Instituto de Geología Económica Aplicada: 17 pp. Concepción.

- CRUDEN, D.M. 1991. A simple definition of landslides. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. Vol. **43**: 27-29.
- CRUDEN, D.M. & VARNES, D.J. 1996. Landslides: Investigation and Mitigation, Chapter 3: Landslide types and processes. *Transportation Research Board, U.S. National Academy of Sciences, Special Report*. N° **247**: 36-75.
- DAI, F.C.; LEE, C.F.; LI, J. & XU, Z.W. 2001. Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Environmental Geology*. Vol. **40**: 381-391.
- DAMAYANTI, A.; ANGIN, F.; ADIB, A. & IRFAN, M. 2020. Geomorphological Characteristic of Landslide Hazard Zones in Sukarame Village, Cisolok Subdistric, Sukabumi Regency. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. **412** (1): 8 pp.
- DARWIN, C.R. 1846. Geological Observations on South America. Smith, Elder & Co.: 314 pp. Londres.
- DECKART, K.; HERVÉ, F.; FANNING, C.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. *Andean Geology*. Vol. **41** (1): 49-82.
- DEGRAFF, J.V.; BRYCE, R.; JIBSON, R.W.; MORA, S. & ROGERS, C.T. 1989. Landslides: their extent and significance in the Caribbean. *Landslides: Extent and Economic Significance*. Vol. **68**: 51-80.
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA). 2004a. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del río Andalién. Realizado por Cade-Idepe Ingeniería y Desarrollo de Proyectos Ltda: 60 pp. Santiago.
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA). 2004b. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del Río Bio Bio. Realizado por Cade-Idepe Ingeniería y Desarrollo de Proyectos Ltda: 179 pp. Santiago.
- DU, G.-L.; ZHANG, Y.-S.; IQBAL, J.; YANG, Z.-H. & YAO, X. 2017. Landslide susceptibility mapping using an integrated model of information value method and logistic regression in the Bailongjiang watershed, Gansu Providence, China. *Journal of Mountain Science*. Vol. **14** (2): 249-268.

- ERRÁZURIZ, A.M.; CERECEDA, P.; GONZÁLEZ, J.I.; GONZÁLEZ, M.; HENRÍQUEZ, M. & RIOSECO, R. 1998. Manual de Geografía de Chile (Errázuriz, A.M. editora). Editorial Andrés Bello: 433 pp. Santiago.
- FALCÓN, F.; ARANCIBIA, J.P. & VÁSQUEZ, P. 2010a. Efectos geológicos del sismo del 27 de febrero de 2010: observaciones de daños en la comuna de Chiguayante (INF-BIOBIO-14). Servicio Nacional de Geología y Minería: 11 pp. Santiago.
- FALCÓN, M.F.; RAMÍREZ, P.; ARENAS, M.; CREIXELL, C.; HUERTA, S. & MARÍN, M.F. 2010b. Evaluación preliminar de peligros geológicos: Área de Concepción-Talcahuano-Hualpén-Chiguayante, Región del Biobío. Mapa 12-1: Peligro de Remociones en Masa. Servicio Nacional de Geología y Minería, Geología para la Reconstrucción y la Gestión del Riesgo. Vol. **1**: 12 pp. Santiago.
- FAROOQ, S. & AKRAM, M.S. 2021. Comparison of data-driven landslide susceptibility assessment using weight of evidence, information value, frequency ratio and certainty factor methods. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*. Vol. **18** (3): 301-317.
- FAWCETT, T. 2006. An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*. Vol **27** (8): 861-874.
- FAYEZ, L.; PHAM, B.T.; SOLANKI, H.A.; PAZHMAN, D.; DHOLAKIA, M.B.; KHALID, M. & PRAKASH, I. 2018. Application of Frequency Ratio Model for the Development of Landslide Susceptibility Mapping at Part of Uttarakhand State, India. *International Journal of Applied Engineering Research*. Vol. **13** (9): 6846-6854.
- FELL, R.; COROMINAS, J.; BONNARD, C.; CASCINI, L.; LEROI, E. & SAVAGE, W.Z. 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*. Vol. **102** (3-4): 85-98.
- FERRARIS, F. 1981. Hoja Los Ángeles-Angol, Región del Biobío. *Instituto de Investigaciones Geológicas, Mapas Geológicos Preliminares de Chile*. N° **5**: 26 pp, 1 mapa en escala 1:250.000. Santiago.
- FLORES, M.M. 2010. Procesos de remoción en masa asociados al sismo de 8.8 mw del 27/F 2010 en el litoral de Concepción, Chile. *Sociedad Hoy*. N° **19**: 11-32.

- FRUTOS, J.; MENCARINI, P.; PINCHEIRA, M.; BOURRET, Y. & ALFARO, G. 1982. Geología de la isla Quiriquina. Congreso Geológico Chileno N° 3. Acta **3**: 307-338 pp. Concepción.
- GALLI, C. 1967. Geología urbana y suelo de Fundación de Concepción y Talcahuano, Chile. Informe final de Proyecto de Investigación de la Comisión de Investigación Científica de la Universidad de Concepción. N° **75**: 267 pp. Concepción.
- GALLI, C. & LEMKE, R.W. 1963. Investigaciones de Geología aplicada a la Ingeniería, Provincia de Concepción. *Instituto de Investigaciones Geológicas*. N° **13**: 79 pp. Santiago.
- GALLI, M. & GUZZETTI, F. 2007. Landslide Vulnerability Criteria: A Case Study from Umbria, Central Italy. *Environmental Management*. Vol. **40** (4): 649-665.
- GAJARDO, L. 2022. Método estadístico bivariado (Frequency Ratio) para modelar la susceptibilidad a remociones en masa e identificar unidades geomorfológicas susceptibles: Una herramienta para la gestión del riesgo en las comunas de Concepción, Hualpén, Chiguayante y Talcahuano. Memoria para optar al título de Geógrafo o Geógrafa. Universidad de Concepción, Departamento de Geografía (Inédito): 136 pp., Concepción.
- GARCÍA, Y. 2004. Aplicación de los métodos círculo de Mohr y programa reactiva 2.4, en el análisis del stress en las estructuras mayores del área de la ciudad de Concepción, VIII Región del Bío-Bío, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra: 119 pp., Concepción.
- GARCÍA-RODRÍGUEZ, M.J.; MALPICA, J.A.; BENITO, B. & DÍAZ, M. 2008. Susceptibility assessment of earthquake-triggered landslides in El Salvador using logistic regression. *Geomorphology*. Vol. **95** (3-4): 172-191.
- GAYOSO, J. & IROUME, A. 1995. Impacto del manejo de plantaciones sobre el ambiente físico. *Bosque*. Vol. **16** (2): 3-12. Valdivia.
- GEOLOGÍA DE CAMPO II. 2009. Geología del sector costero, Provincia de Concepción, Región del Biobío, Chile. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 353 pp. Concepción.
- GEOLOGÍA DE CAMPO II. 2012. Geología de los cuadrángulos Coronel, Santa Juana, Concepción, Hualqui, Carampengué y San Jerónimo, entre los 36°57'-37°16' Latitud Sur

- y los 72°45'-73°15' Longitud Oeste, Región del Biobío, Chile. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 288 pp. Concepción.
- GEOLOGÍA DE CAMPO II. 2015. Geología del sector nororiental del Río Biobío, entre las coordenadas 36°58'-37°12'S y 73°00'-72°43'W, Región del Biobío, Chile. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 181 pp. Concepción.
- GEOLOGÍA DE CAMPO II. 2019. Geología del sector costero de la Provincia de Concepción, entre los paralelos 36°31' y 36°50'S, y los meridianos 72°55' y 73°13'W, Región del Biobío, Chile. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 187 pp. Concepción.
- GEOLOGÍA DE CAMPO II. 2021. Geología del sector costero de la Provincia de Concepción entre los 36°33'35''-37°08'03''S y 73°00'09'-73°17'38''W, Región del Biobío, Chile. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 183 pp. Concepción.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L.; FERRER, M.; ORTUÑO, L. & OTEO, C. 2002. Ingeniería Geológica. Pearson Educación: 744 pp. Madrid.
- GORSEVSKI, P. V.; GESSLER, P. & FOLTZ, R.B. 2000. Spatial prediction of landslide hazard using logistic regression and GIS. *4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4): Problems, Prospects and Research Needs*. N° **110**: 4-5.
- GUZZETTI, F.; CARRARA, A.; CARDINALI, M. & REICHENBACH, P. 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*. Vol. **31** (1-4): 181-216.
- HE, S.; PAN, P.; DAI, L.; WANG, H. & LIU, J. 2012. Application of kernel-based Fisher discriminant analysis to map landslide susceptibility in the Qinggan River delta, Three Gorges, China. *Geomorphology*. Vol. **171-172**: 30-41.
- HEINE, R.A.; LANT, C.L. & SENGUPTA, R.R. 2004. Development and comparison of approaches for automated mapping of stream channel networks. *Annals of the Association of American Geographers*. Vol. **94** (3): 477-490.

- HENRIQUES, C.; ZÉZERE, J.L. & MARQUES, F. 2015. The role of the lithological setting on the landslide pattern and distribution. *Engineering Geology*. Vol. **189**: 17-31.
- HERVÉ, F. 1977. Petrology of the Crystalline Basement of the Nahuelbuta Mountains, southcentral Chile. Comparative Studies on the Geology of the Curcum-Pacific orogenic belt in Japan and Chile. *Japan Society for the Promotion of Science*: 1-51. Tokyo.
- 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. Geodynamic Series*. Vol. **18**: 97-113.
- HUGGETT, R.J. 2011. Fundamentals of Geomorphology, Third Edition. Routledge: 536 pp. Abingdon.
- HUNGR, O.; LEROUEIL, S. & PICARELLI, L. 2013. The Varnes classification of landslides types, an update. *Landslides*. Vol. **11**: 167-194.
- IAEG COMMISSION ON LANDSLIDES. 1990. Suggested nomenclature for landslides. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. Vol. **41** (1): 13-16.
- IQBAL, J.; PENG, C.; HUSSAIN, M. L.; POURGHASEMI, H. R.; DE-QIANG, C.; SHAH, S. U. & PRADHAN, B. 2021. Landslide susceptibility assessment along the dubair-dudishal section of the Karakoram Highway, Northwestern Himalayas, Pakistan. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*. Vol. **18** (2): 137-155.
- ISLAM, M.A.; ISLAM, M.S. & ISLAM, T. 2017. Landslides in Chittagong hill tracts and possible measures. *Proceedings of the International Conference on Disaster Risk Mitigation*. Vol. **23**: 4 pp.
- JAQUE, E.; FERNÁNDEZ, A.; FUENTES, A. & OJEDA, C.G. 2021. Data-based wildfire model for Mediterranean ecosystems - case study of the concepción metropolitan area in central Chile. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. Vol. **21** (12): 3663-3678.
- KARTIC KUMAR, M.; ANNADURAI, R.; RAVICHANDRAN, P.T. & ARUMUGAM, K. 2015. Mapping of Landslide Susceptibility Using Analytical Hierarchy Process at Kothagiri

- Taluk, Tamil Nadu, India. *International Journal of Applied Engineering Research*. Vol. **10** (3): 5503-5523.
- KEEFER, D.K. 1984. Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*. Vol. **95** (4): 406-421.
- KORNEJADY, A.; HEIDARI, K. & NAKHAVALI, M. 2015. Assessment of landslide susceptibility, semi-quantitative risk and management in the Ilam dam basin, Ilam, Iran. *Environmental Resources Research*. Vol. **3** (1): 85-109.
- KUMAR, A.; SHARMA, R.K. & BANSAL, V.K. 2019. GIS-based comparative study of information value and frequency ratio method for landslide hazard zonation in a part of mid-Himalaya in Himachal Pradesh. *Innovative Infrastructure Solutions*. Vol. **4**: 1-17.
- LEE, S. & PRADHAN, B. 2007. Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides*. Vol. **4** (1): 33-41.
- LEE, S. & SAMBATH, T. 2006. Landslide susceptibility mapping in the Damrei Romel area, Cambodia using frequency ratio and logistic regression models. *Environmental Geology*. Vol. **50**: 847-855.
- LEE, S.; LEE, M.-J. & WON, J.-S. 2004. Study on Landslide using GIS and Remote Sensing at the Kangneung Area (II)-Landslide Susceptibility Mapping and Cross-Validation using the Probability Technique. *Economic and Environmental Geology*. Vol. **37** (5): 521-532.
- LEPPE, M.; MOISAN, P.; ABAD, E. & PALMA-HELDT, S. 2006. Paleobotánica del Triásico Superior del valle del río Biobío, Chile: Clase Filicopsida. *Revista Geológica de Chile*. Vol. **33** (1): 81-107.
- LIU, Z.; QIU, H.; ZHU, Y.; YANG, D.; MA, S.; ZHANG, J.; WANG, Y.; WANG, L. & TANG, B. 2022. Efficient Identification and Monitoring of Landslides by Time-Series InSAR Combining Single- and Multi-Look Phases. *Remote Sensing*. Vol. **14** (4): 24 pp.
- LUO, X.; LIN, F.; ZHU, S.; YU, M.; ZHANG, Z.; MENG, L. & PENG, J. 2019. Mine landslide susceptibility assessment using IVM, ANN and SVM models considering the contribution of affecting factors. *PLoS One*. Vol. **14** (4): 18 pp.

- MALGOT, J. & BALIAK, F. 2002. The influence of human activity on the development of landslides in Slovakia. *Geograficky Casopis Slovenskej Akademie Vied*. Vol. **54**: 21-38.
- MARDONES, M. & ROJAS, J. 2012. Procesos de remoción en masa inducidos por el terremoto del 27F de 2010 en la franja costera de la Región del Biobío, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*. Vol. **53**: 57-74.
- MARÍN, M.V.; MUÑOZ, A.A. & NARANJO, J.A. 2018. Víctimas fatales causadas por remociones en masa en Chile (1928-2017). Congreso Geológico Chileno N° 15, Sesión General Peligros y Riesgos Geológicos: 216-219.
- MELLA, O. 2017. Zonificación de amenaza por procesos de remoción en los campamentos de Talcahuano, Región del Biobío, Chile. *Revista CIS*. Vol. **14** (23): 115-132.
- MERGILI, M.; MARCHANT SANTIAGO, C.I. & MOREIRAS, S.M. 2015. Causas, características e impacto de los procesos de remoción en masa, en áreas contrastantes de la región Andina. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*. Vol. **24** (2): 113-131.
- MEZUGHI, T.H.; AKHIR, J.M.; RAFEK, A.G. & ABDULLAH, I. 2011. Landslide Susceptibility Assessment using Frequency Ratio Model Applied to an Area along the E-W Highway (Gerik-Jeli). *American Journal of Environmental Sciences*. Vol. **7** (1): 43-50.
- MINISTERIO DE VIVIENDA Y URBANISMO (MINVU). 2013. Imágenes y Cartografía Base para el área Metropolitana de Concepción, Región del Bío Bío. Gobierno de Chile.
- MINISTERIO DE VIVIENDA Y URBANISMO (MINVU). 2016. Actualización Plan Regulador Comunal de Hualqui, Región del Bío Bío. Etapa 5: Proyecto Informe de Avance N°5, Edición 2, Memoria Explicativa: 148 pp.
- MORADI, S. & REZAEI, M. 2014. A GIS-based comparative study of the analytic hierarchy process, bivariate statistics and frequency ratio methods for landslide susceptibility mapping in part of the Tehran metrópolis, Iran. *Geopersia*. Vol. **4** (1): 45-61.
- MORENO, M. 2004. Dinámica del Antearco Externo en la zona del Bloque de Arauco, 37°-38° S, Octava Región, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra: 130 pp., Concepción.

- MUNIZAGA, F.; AGUIRRE, L. & HERVÉ, F. 1973. Rb/Sr ages of rocks from the Chilean metamorphic basement. *Earth and Planetary Science Letters*. Vol. **18** (1): 87-92.
- 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. Servicio Nacional de Geología y Minería: 24 pp. Santiago.
- NARANJO, J.A.; ARENAS, M. & RAMÍREZ, P. 2006a. 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. Servicio Nacional de Geología y Minería: 22 pp. Santiago.
- NARANJO, J.A.; RAMÍREZ, P.; CLAVERO, J. & HAUSER, A. 2006b. Remociones en masa causadas por lluvias torrenciales, junio 26 – 27, 2005 Concepción, VIII Región. Congreso Geológico Chileno N° 11. Actas **2**: 109-112. Antofagasta.
- NEFESLIOGLU, H.A.; DUMAN, T.Y. & DURMAZ, S. 2008. Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Eastern Black Sea region or Turkey). *Geomorphology*. Vol. **94** (3-4): 401-418.
- NIELSEN, S.N. 2005. The Triassic Santa Juana Formation at the lower Biobío River, south central Chile. *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. **19** (4): 547-562.
- PÁNEK, T. 2020. Landslides and Related Sediments. Encyclopedia of Geology, Second Edition (Alderton, D. & Elias, S.A. editores): 708-728.
- PATHAK, L. & DEVKOTA, K.C. 2022. Landslide susceptibility assessment in the Rangun Khola watershed of far western Nepal. *Journal of Nepal Geological Society*. Vol. **63**: 33-44.
- PHAM, B.T.; BUI, D.T.; PRAKASH, I. & DHOLAKIA, M.B. 2015. Landslide Susceptibility Assessment at a Part of Uttarakhand Himalaya, India using GIS-based Statistical Approach of Frequency Ratio Method. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. Vol. **4** (11): 338-344.
- PINEDA, V. 1983. Evolución paleográfica de la Península de Arauco durante el Cretácico Sup-Terciario. Memoria para optar el Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología y Geofísica (Inédito): 239 pp. Santiago.

- POBLETE, M. 1967. El Subsuelo del Centro de Concepción en relación con el Diseño Antisísmico. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (Inédito): 76 pp. Santiago.
- POKHAREL, B. & THAPA, P.B. 2019. Landslide susceptibility in Rasuwa District of central Nepal after the 2015 Gorkha Earthquake. *Journal of Nepal Geological Society*. Vol. **59**: 79-88.
- PRADHAN, B. & LEE, S. 2010. Delineation of landslide hazard areas on Penang Island, Malaysia, by using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models. *Environmental Earth Sciences*. Vol. **60**: 1037-1054.
- PRADHAN, B. 2011. An assessment of the use of an advanced neural network model with five different training strategies for the preparation of landslide susceptibility maps. *Journal of Data Science*. Vol. **9** (1): 65-81.
- PRADHAN, A.M.S.; DAWADI, A. & KIM, Y.T. 2012. Use of different bivariate statistical landslide susceptibility methods: A case study of Kulekhani watershed, Nepal. *Journal of Nepal Geological Society*. Vol. **44**: 1-12.
- PRASAD, N.N. 1995. Landslides - Causes & Mitigation. *Centre for Water Resources Development, Kerala, India*. Vol. **21**: 48-54.
- PROYECTO MULTINACIONAL ANDINO: GEOCIENCIAS PARA LAS COMUNIDADES ANDINAS (PMA:GCA). 2007. Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional*. Vol. **4**: 432 pp. Santiago.
- REGMI, A.D.; YOSHIDA, K.; POURGHASEMI, H.R.; DHITAL, M.R. & PRADHAN, B. 2014a. Landslide Susceptibility Mapping along Bhalubang – Shiwapur Area of Mid-Western Nepal Using Frequency Ratio and Conditional Probability Models. *Journal of Mountain Science*. Vol **11** (5): 1266-1285.
- REGMI, A.D.; DEVKOTA, K.C.; YOSHIDA, K.; PRADHAN, B.; POURGHASEMI, H.R.; KUMAMOTO, T. & AKGUN, A. 2014b. Application of frequency ratio, statistical index,

- and weights-of-evidence models and their comparison in landslide susceptibility mapping in Central Nepal Himalaya. *Arabian Journal of Geosciences*. Vol. **7**: 725-742.
- RIESTENBERG, M.M. & SOVONICK-DUNFORD, S. 1983. The role of woody vegetation in stabilizing slopes in the Cincinnati area, Ohio. *Geological Society of America Bulletin*. Vol. **94** (4): 506-518.
- ROJAS, O.; MARDONES, M.; ROJAS, C.; MARTÍNEZ, C. & FLORES, L. 2017. Urban Growth and Flood Disasters in the Coastal River Basin of South-Central Chile (1943-2011). *Sustainability*. Vol. **9** (2): 21 pp.
- ROTARU, A.; OAJDEA, D. & RĂILEANU, P. 2007. Analysis of the Landslide Movements. *International Journal of Geology*. Vol. **1** (3): 70-79.
- SAADATKHAH, N.; KASSIM, A. & LEE, L.M. 2015. Susceptibility Assessment of Shallow Landslides in Hulu Kelang Area, Kuala Lumpur, Malaysia Using Analytical Hierarchy Process and Frequency Ratio. *Geotechnical and Geological Engineering*. Vol. **33**: 43-57.
- SAHA, A.K.; GUPTA, R.P. & ARORA, M.K. 2002. GIS-based landslide hazard zonation in the Bhagirathi (Ganga) valley, Himalayas. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. **23** (2): 357-369.
- SALAZAR, C. 2004. Ammonites del Maastrichtiano de la Formación Quiriquina, VIII Región del Bío-Bío, Chile: sistemática, bioestratigrafía y afinidades paleobiogeográficas. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 149 pp., Concepción.
- SALEH, A.; YUZIR, A. & SABTU, N. 2022. Flash Flood Susceptibility Mapping of Sungai Pinang Catchment using Frequency Ratio. *Sains Malaysiana*. Vol. **51** (1): 51-65.
- SECRETARÍA COMUNAL DE PLANIFICACIÓN (SECPLAN). 2023. Plan de Desarrollo Comunal (PLADECO) 2023-2026 Comuna de Chiguayante. En: https://www.chiguayante.cl/attachments/article/91/pladeco_2023-2026.pdf. Consultado el 08/09/2023. Consultado el 08/09/2023.

- SEPÚLVEDA, S.A. & SEREY, A. 2009. Tsunamigenic earthquake-triggered rock slope during the April 21, 2007 Aisén earthquake, southern Chile (45.5°S). *Andean Geology*. Vol. **36** (1): 131-136.
- SCHUSTER, R.L. & HIGHLAND, L.M. 2003. Impact of Landslides and Innovative Landslide-Mitigation Measures on the Natural Environment. *International Conference on Slope Engineering, Hong Kong, China*. Vol. **8** (10): 46 pp.
- SCHUSTER, R.L. & HIGHLAND, L.M. 2007. The Third Hans Cloos Lecture. Urban landslides: socioeconomic impacts and overview of mitigative strategies. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. Vol. **66**: 1-27.
- SENGUPTA, A.; GUPTA, S. & ANBARASU, K. 2010. Rainfall thresholds for the initiation of landslide at Lanta Khola in north Sikkim, India. *Natural Hazards*. Vol. **52**: 31-42.
- SHANO, L.; RAGHUVANSHI, T.K. & METEN, M. 2021. Landslide susceptibility mapping using frequency ratio model: the case of Gamo highland, South Ethiopia. *Arabian Journal of Geosciences*. Vol. **14**: 1-18.
- SHENG, M.; ZHOU, J.; CHEN, X.; TENG, Y.; HONG, A. & LIU, G. 2022. Landslide Susceptibility Prediction Based on Frequency Ratio Method and C5.0 Decision Tree Model. *Frontiers in Earth Science*. Vol. **10**: 14 pp.
- SIDLE, R.C.; GRECO, R. & BOGAARD, T. 2019. Overview of Landslide Hydrology. *Water*. Vol. **11** (1): 148.
- SIMONS, D.B.; LI, R.M. & WARD, T.J. 1978. Mapping of potential landslide áreas in terms of slope stability. Tesis doctoral. Colorado State University (Inédito): 80 pp. Fort Collins.
- SOETERS, R. & WESTEN, C.J. v. 1996. Slope instability recognition, analysis and zonation. *Landslides: investigation and mitigation*. Vol. **247**: 129-177.
- SOLLE, M.S. & AHMAD, A. 2016. Identification of Soil, Rock and Tecto-Volcanism on Landslides in Tondano Watershed. *Journal of Geological Resource and Engineering*. Vol. **6**: 271-282.

- STROM, A. 2013. Use of Indirect Evidence for the Prehistoric Earthquake-Induced Landslides Identification. *Earthquake-Induced Landslides: Proceedings of the International Symposium on Earthquake-Induced Landslides, Kiryu, Japan*: 21-30.
- SVALOVA, V.B.; ZAALISHVILI, V.B.; GANAPATHY, G.P.; NIKOLAEV, A.V. & MELKOV, D.A. 2019. Landslide risk in mountain areas. *Geology and Geophysics of the South of Russia*. Vol. **10** (2): 109-126.
- SWANSTON, D.N. 1978. Effect of geology on soil mass movement activity in the Pacific Northwest. *Forest Soils and Land Use*: 89-115.
- TAVERA, J. 1960. El Triásico del valle inferior del Río Biobío. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. *Anales N° 17*: 321-349.
- TAZIK, E.; JAHANTAB, Z.; BAKHTIARI, M.; REZAEI, A. & ALAVIPANAH, S.K. 2014. Landslide susceptibility mapping by combining the three methods Fuzzy Logic, Frequency Ratio and Analytical Hierarchy Process in Dozain basin. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. **40**: 267-272.
- THIRARD, G.; GRANDJEAN, G.; THIERY, Y.; MAQUAIRE, O.; FRANÇOIS, B.; LISSAK, C. & COSTA, S. 2020. Hydrogeological assessment of a deep-seated coastal landslide based on a multi-disciplinary approach. *Geomorphology*. Vol. **371**: 17 pp.
- TRISNAWATI, D.; NAJIB. & HIDAYATILLAH, A.S. 2022. The Relationship of Lithology with Landslide Occurrences in Banyumanik and Tembalang Districts, Semarang City. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. **1047** (1): 10 pp.
- TROCH, P.; VAN LOON, E. & HILBERTS, A. 2002. Analytical solutions to a hillslope-storage kinematic wave equation for subsurface flow. *Advances in Water Resources*. Vol. **25** (6): 637-649.
- TSANGARATOS, P. & ILIA, I. 2016. Comparison of a logistic regression and Naïve Bayes classifier in landslide susceptibility assessments: The influence of models complexity and training dataset size. *Catena*. Vol. **145**: 164-179.

- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). 2004. Landslide Types and Processes. Fact Sheet 2004-3072. En: <https://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/pdf/fs2004-3072.pdf>. Consultado el 25/09/2023.
- VAKHSHOORI, V. & ZARE, M. 2018. Is the ROC curve a reliable tool to compare the validity of landslide susceptibility maps?. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. Vol. **9** (1): 249-266.
- VARNES, D.J. 1978. Slope movement types and processes. *Special Report*. Vol. **176**: 11-33.
- VARNES, D.J. 1984. Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. *UNESCO*: 63 pp.
- VERGARA, E. 2020. Análisis de susceptibilidad de remociones en masa en el área del embalse Ralco, Comuna de Alto Biobío, Región del Biobío, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra: 84 pp., Concepción.
- VICK, L.M.; BÖHME, M.; ROUYET, L.; BERGH, S.G.; CORNER, G.D. & LAUKNES, R. 2020. Structurally controlled rock slope deformation in northern Norway. *Landslides*. Vol. 17: 1745-1776.
- VIVALLOS, J.; RAMÍREZ, P. & FONSECA, A. 2010. Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Concepción, Región del Biobío. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental N° 12: 3 mapas en una hoja escala 1:20.000. Santiago.
- WESTEN, C. J. v.; CASTELLANOS, E. & KURIAKOSE, S. L. 2008. Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*. Vol. **102** (3-4): 112-131.
- WESTEN, C.J. v.; RENGERS, N. & SOETERS, R. 2003. Use of Geomorphological Information in Indirect Landslide Susceptibility Assessment. *Natural Hazards*. Vol. **30**: 399-419.
- WESTEN, C. J. v.; ASCH, T. W. v. & SOETERS, R. 2006. Landslide hazard and risk zonation-why is it still so difficult?. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. Vol. **65**: 167-184.

- WIDJAJA, H. 2018. Vegetative engineering as landslide reduction and handling alternative. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. **203** (1): 4 pp.
- WIECZOREK, G.F. 1996. Landslides: investigation and mitigation. Chapter 4-Landslide triggering mechanisms. *Transportation Research Board Special Report*. N° **247**: 76-90.
- WILLNER, A.P.; THOMSON, S.N.; KRÖNER, A.; WARTHÖ, J.-A.; WIJBRANS, J.R. & HERVÉ, F. 2005. Time Markers for the Evolution and Exhumation of a Late Palaeozoic Paired Metamorphic Belt in North-Central Chile (34°-35°30'S). *Journal of Petrology*. Vol. **46** (9): 1835-1858.
- WU, T.; SHIH, H.-J.; LI, H.-C.; SU, Y.-F. & CHEN, Y.-M. 2016a. Landslide Impact Assessment Using Projection Rainfall Data from Climate Change Scenario. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*. Vol. **27** (5): 729-740.
- WU, Y.; LI, W.; WANG, Q.; LIU, Q.; YANG, D.; XING, M.; PEI, Y. & YAN, S. 2016b. Landslide susceptibility assessment using frequency ratio, statistical index and certainty factor models for the Gangu County, China. *Arabian Journal of Geosciences*. Vol. **9**: 1-16.
- WUBALEM, A. 2021. Landslide susceptibility mapping using statistical methods in Uatzau catchment area, northwestern Ethiopia. *Geoenvironmental Disasters*. Vol. **8** (1): 1-21.
- XU, C.; TIAN, Y.; ZHOU, B.; RAN, H. & LYU, G. 2017. Landslide damage along Araniko highway and Pasang Lhamu highway and regional assessment of landslide hazard related to the Gorkha, Nepal earthquake of 25 April 2015. *Geoenvironmental Disasters*. Vol. **4** (1): 1-17.
- YALCIN, A.; REIS, S.; AYDINOGLU, A. C. & YOMRALIOGLU, T. 2011. A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *Catena*. Vol. **85** (3): 274-287.
- YESILNACAR, E. & TOPAL, T. 2005. Landslide susceptibility mapping: A comparison of logistic regression and neural networks methods in a medium scale study, Hendek region (Turkey). *Engineering Geology*. Vol. **79**: 251-266.

YILMAZ, C.; TOPAL, T. & SÜZEN, M.L. 2012. GIS-based susceptibility mapping using bivariate statistical analysis in Devrek (Zonguldak-Turkey). *Environmental Earth Sciences*. Vol. **65**: 2161-2178.

ZHANG, J.; QIU, H.; TANG, B.; YANG, D.; LIU, Y.; LIU, Z.; YE, B.; ZHOU, W. & ZHU, Y. 2022. Accelerating Effect of Vegetation on the Instability of Rainfall-Induced Shallow Landslides. *Remote Sensing*. Vol. **14** (22): 18 pp.



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



ANEXOS

Anexo I: Inventario corregido de puntos de remociones en masa del “Grupo de estudio Multiamenazas Biobío”. Amarillo: comuna de Concepción; verde: comuna de Chiguayante; azul: comuna de Hualqui. Elaboración propia.

N°	NOMBRE	COORDENADAS UTM				SECTOR	TIPO RM	USO DEL PUNTO (ENTRENAM/PRUEBA)	REGISTRADO POR
		Iniciales		Usadas					
		ESTE	NORTE	ESTE	NORTE				
46	JE0001	679367	5922845	679367	5922845	Palomares	Deslizamiento	Prueba	ESPINOZA, J. 2023.
47	JE0002	673631	5925159	673634	5925159	Cerro Chacabuco	Deslizamiento	Prueba	ESPINOZA, J. 2023.
48	JE0004	679590	5922860	679626	5922884	Palomares	Deslizamiento	Entrenamiento	ESPINOZA, J. 2023.
49	JE0006	674734	5921552	674734	5921552	Agüita de la Perdiz, calle Michimalongo	Sin clasificación	Entrenamiento	NARANJO, J. A.; RAMÍREZ, P.; CLAVERO, J. & HAUSER, A. 2006.
50	JE0007	674586	5921277	674586	5921277	Cantera Mahuzier	Deslizamiento	Entrenamiento	NARANJO, J. A.; RAMÍREZ, P.; CLAVERO, J. & HAUSER, A. 2006.
51	JE0008	679606	5923147	679656	5923183	Palomares	Sin clasificación	Prueba	NARANJO, J.; ARENAS, M. & RAMÍREZ, P. 2006.
52	JE0036	674651	5922105	674649	5922101	Cerro Caracol	Caída de roca	Entrenamiento	MARDONES FLORES, M. & ROJAS HERNÁNDEZ, J. 2012.
53	JE0060	674165	5919848	674165	5919848	Quinta Junge, Pedro de Valdivia	Flujo de barro	Entrenamiento	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J.; BALTIERRA, F. & PINO, F. 2023.)
54	JE0061	674181	5919873	674181	5919873	Quinta Junge, Pedro de Valdivia	Flujo de barro	Entrenamiento	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J.; BALTIERRA, F. & PINO, F. 2023.)
55	JE0062	674188	5919914	674188	5919914	Quinta Junge, Pedro de Valdivia	Deslizamiento traslacional de tierra, y flujo de barro	Entrenamiento	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J.; BALTIERRA, F. & PINO, F. 2023.)
56	JE0063	674243	5920012	674243	5920012	Quinta Junge, Pedro de Valdivia	Deslizamiento traslacional de tierra	Entrenamiento	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J.; BALTIERRA, F. & PINO, F. 2023.)
57	JE0064	674177	5920242	674177	5920242	Pedro de Valdivia	Deslizamiento traslacional de tierra	Entrenamiento	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J.; BALTIERRA, F. & PINO, F. 2023.)
58	JE0065	674159	5920135	674159	5920135	Pedro de Valdivia	Flujo de barro	Entrenamiento	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J.; BALTIERRA, F. & PINO, F. 2023.)
59	JE0066	674059	5920141	674059	5920141	Pedro de Valdivia	Deslizamiento traslacional de tierra	Prueba	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J.; BALTIERRA, F. & PINO, F. 2023.)
60	JE0067	673981	5920563	673981	5920563	Pedro de Valdivia	Deslizamiento traslacional de tierra	Entrenamiento	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J.; BALTIERRA, F. & PINO, F. 2023.)
61	JE0068	673795	5920976	673795	5920976	Pedro de Valdivia	Deslizamiento traslacional de tierra	Prueba	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J.; BALTIERRA, F. & PINO, F. 2023.)
62	JE0069	673811	5921016	673811	5921016	Pedro de Valdivia	Deslizamiento traslacional de tierra	Entrenamiento	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J.; BALTIERRA, F. & PINO, F. 2023.)

Continúa en la página 124

Continuación del Anexo I

N°	NOMBRE	COORDENADAS UTM				SECTOR	TIPO RM	USO DEL PUNTO (ENTRENAM/PRUEBA)	REGISTRADO POR
		Iniciales		Usadas					
		ESTE	NORTE	ESTE	NORTE				
63	JE0070	673762	5921033	673762	5921033	Pedro de Valdivia	Deslizamiento traslacional de tierra	Entrenamiento	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J.; BALTIERRA, F. & PINO, F. 2023.)
64	JE0071	673739	5921032	673739	5921032	Pedro de Valdivia	Deslizamiento traslacional de tierra	Prueba	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J.; BALTIERRA, F. & PINO, F. 2023.)
65	JE0072	673721	5921038	673721	5921038	Pedro de Valdivia	Deslizamiento traslacional de tierra	Entrenamiento	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J.; BALTIERRA, F. & PINO, F. 2023.)
66	JE0073	673592	5921024	673592	5921024	Pedro de Valdivia	Deslizamiento traslacional de tierra	Entrenamiento	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J.; BALTIERRA, F. & PINO, F. 2023.)
67	JE0074	674124	5920677	674124	5920677	Pedro de Valdivia	Deslizamiento traslacional de tierra y rocas	Entrenamiento	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J.; BALTIERRA, F. & PINO, F. 2023.)
68	JE0075	674184	5919866	674184	5919866	Quinta Junge, Pedro de Valdivia	Flujo de barro	Entrenamiento	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J.; BALTIERRA, F. & PINO, F. 2023.)
69	JE0076	674062	5920221	674062	5920221	Pedro de Valdivia	Deslizamiento traslacional de tierra	Prueba	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J.; BALTIERRA, F. & PINO, F. 2023.)
70	JE0077	673802	5920089	673802	5920089	Pedro de Valdivia	Deslizamiento traslacional de tierra	Entrenamiento	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J.; BALTIERRA, F. & PINO, F. 2023.)
71	JE0078	673581	5920944	673581	5920944	Pedro de Valdivia	Deslizamiento traslacional de tierra	Entrenamiento	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J.; BALTIERRA, F. & PINO, F. 2023.)
72	JE0090	674624	5921650	674624	5921650	Aguíta de la Perdiz	Deslizamiento de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
73	JE0091	675000	5924260	675000	5924260	Cerro La Pólvara	Deslizamiento de tierra	Prueba	GAJARDO, P. 2022.
74	JE0092	674964	5924260	674964	5924260	Cerro La Pólvara	Deslizamiento de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
75	JE0095	674971	5924240	674970	5924242	Cerro La Pólvara	Flujo de barro	Prueba	GAJARDO, P. 2022.
76	JE0098	676260	5922800	676260	5922800	Población Huáscar	Deslizamiento de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
77	JE0101	680770	5924210	680744	5924238	Palomares	Deslizamiento de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
78	JE0103	676596	5922590	676596	5922590	Los Lirios	Deslizamiento de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
79	JE0104	679394	5922940	679387	5922943	Palomares	Deslizamiento de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
80	JE0108	676721	5922350	676721	5922350	Nonguén	Flujo de barro	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
81	JE0110	675515	5922890	675515	5922890	Cerro La Virgen	Deslizamiento de tierra	Prueba	GAJARDO, P. 2022.
82	JE0111	674542	5919830	674543	5919830	Pedro de Valdivia	Deslizamiento de tierra	Prueba	GAJARDO, P. 2022.

Continúa en la página 125

Continuación del Anexo I

N°	NOMBRE	COORDENADAS UTM				SECTOR	TIPO RM	USO DEL PUNTO (ENTRENAM/PRUEBA)	REGISTRADO POR
		Iniciales		Usadas					
		ESTE	NORTE	ESTE	NORTE				
83	JE0112	675299	5924630	675299	5924630	Cerro La Pólvara	Deslizamiento de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
84	JE0114	674974	5921750	674974	5921750	Barrio Universitario	Deslizamiento de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
85	JE0115	674777	5921380	674777	5921380	Aguíta de la Perdiz	Deslizamiento de tierra to Flujo de barro	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
86	JE0116	672196	5923200	672196	5923200	Cerro Chepe	Flujo de barro	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
87	JE0119	674979	5924440	674979	5924440	Cerro La Pólvara	Deslizamiento de tierra	Prueba	GAJARDO, P. 2022.
88	JE0120	673451	5921470	673451	5921470	Pedro de Valdivia	Flujo de barro	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
89	JE0122	674625	5922070	674625	5922070	Victor Lamas	Deslizamiento de tierra	Prueba	GAJARDO, P. 2022.
90	JE0124	674936	5924270	674936	5924270	Cerro La Pólvara	Deslizamiento de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
91	JE0125	673466	5921500	673466	5921500	Pedro de Valdivia	Flujo de barro	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
92	JE0126	673577	5925140	673569	5925137	Cerro Chacabuco	Caída de roca	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
93	JE0127	676870	5922400	676870	5922400	Villa Las Garzas	Flujo de barro	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
94	JE0128	674989	5924280	674989	5924280	Cerro La Pólvara	Flujo de barro	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
95	JE0129	678729	5922250	678729	5922250	Palomares	Flujo de barro	Prueba	GAJARDO, P. 2022.
96	JE0134	678636	5922280	678635	5922295	Palomares	Flujo de barro	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
97	JE0136	676961	5922340	676961	5922340	Los Lirios	Flujo de barro	Prueba	GAJARDO, P. 2022.
98	JE0138	674804	5921730	674786	5921746	Aguíta de la Perdiz	Deslizamiento de tierra	Prueba	GAJARDO, P. 2022.
99	JE0140	679265	5922890	679265	5922890	Palomares	Deslizamiento de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
100	JE0142	677235	5922100	677235	5922100	Los Lirios	Flujo de barro	Prueba	GAJARDO, P. 2022.
101	JE0143	677495	5920260	677495	5920260	Nonguén	Flujo de barro	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
102	JE0144	679265	5922890	679265	5922890	Palomares	Deslizamiento de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
103	JE0145	674477	5921550	674477	5921550	Aguíta de la Perdiz	Deslizamiento de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
104	JE0146	673610	5925210	673610	5925210	Cerro Chacabuco	Deslizamiento de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
105	JE0147	674422	5921510	674422	5921510	Aguíta de la Perdiz	Deslizamiento de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
106	JE0148	674936	5924230	674936	5924230	Cerro La Pólvara	Deslizamiento de escombros	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
107	JE0152	675138	5924480	675138	5924480	Cerro La Pólvara	Deslizamiento de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
108	JE0153	675422	5923020	675441	5923015	Cerro La Virgen	Deslizamiento de tierra y roca	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
109	JE0154	675166	5924390	675165	5924393	Cerro La Pólvara	Deslizamiento de tierra	Prueba	GAJARDO, P. 2022.
110	JE0155	673729	5925290	673729	5925290	Cerro Chacabuco	Deslizamiento de tierra	Prueba	GAJARDO, P. 2022.
111	JE0156	674966	5925894	674960	5925889	Cerro Estanque, Lo Galindo	Deslizamiento de tierra to Flujo de barro	Prueba	GAJARDO, P. 2022. Polígonos por ESPINOZA, J. 2023.

Continúa en la página 126

Continuación del Anexo I

N°	NOMBRE	COORDENADAS UTM				SECTOR	TIPO RM	USO DEL PUNTO (ENTRENAM/PRUEBA)	REGISTRADO POR
		Iniciales		Usadas					
		ESTE	NORTE	ESTE	NORTE				
112	JE0165	682696	5925180	682714	5925239	Villa Juan Riquelme	Flujo de barro	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
113	JE0167	677973	5922080	677973	5922144	Nonguén	Deslizamiento de suelo	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
114	JE0168	687809	5922790	687809	5922790	Puente 4	Deslizamiento de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
115	JE0170	676140	5925349	676140	5925349	El Manzano	Deslizamiento de tierra	Prueba	ROBLEDO, D. 2022.
116	JE0171	676142	5925334	676142	5925334	El Manzano	Deslizamiento de tierra	Entrenamiento	ROBLEDO, D. 2022.
117	JE0172	676140	5925354	676140	5925354	El Manzano	Deslizamiento de tierra	Prueba	ROBLEDO, D. 2022.
118	JE0237	674896	5924228	674876	5924218	Cerro La Pólvara	Deslizamiento	Entrenamiento	Sin información
119	JE0238	674923	5924258	674923	5924258	Cerro La Pólvara	Deslizamiento	Entrenamiento	Sin información
120	JE0239	675155	5924334	675155	5924334	Cerro La Pólvara	Caída y deslizamiento de roca	Entrenamiento	CREIXELL, C.; CANCINO, G. & RAMÍREZ, P. 2010.
121	JE0240	672302	5923111	672307	5923112	Cerro Chepe	Caída de roca, escombros y tierra	Entrenamiento	CREIXELL, C.; CANCINO, G. & RAMÍREZ, P. 2010. Polígonos por ESPINOZA, J. 2023.
122	JE0241	674678	5921272	674664	5921269	Aguita de la Perdiz	Deslizamiento	Entrenamiento	Sin información
123	JE0260	671712	5922920	671712	5922920	Cerro Chepe	Deslizamiento de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
124	JE0261	671716	5922908	671716	5922908	Cerro Chepe	Deslizamiento de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
125	JE0262	671729	5922899	671729	5922899	Cerro Chepe	Deslizamiento de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
126	JE0281	673424	5921456	673424	5921456	Pedro de Valdivia	Flujo de barro	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
127	JE0282	674402	5921934	674402	5921934	Cerro Caracol	Flujo de escombros	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
128	JE0283	674324	5921599	674324	5921599	Cerro Caracol	Deslizamiento de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
129	JE0284	674295	5921561	674295	5921561	Cerro Caracol	Deslizamiento de tierra	Prueba	GAJARDO, P. 2022.
130	JE0285	674379	5921392	674379	5921392	Cerro Caracol	Deslizamiento de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
131	JE0286	674382	5921387	674382	5921387	Cerro Caracol	Deslizamiento de tierra	Prueba	GAJARDO, P. 2022.
132	JE0287	674378	5921397	674378	5921397	Cerro Caracol	Deslizamiento de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
133	JE0288	675041	5921754	675039	5921755	Aguita de la Perdiz	Deslizamiento de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
134	JE0289	674455	5921976	674461	5921975	Cerro Caracol	Caída de roca	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
135	JE0290	674455	5921963	674455	5921963	Cerro Caracol	Deslizamiento de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022. Polígonos por ESPINOZA, J. 2023.
136	JE0291	674463	5921994	674463	5921994	Cerro Caracol	Caída de roca	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
137	JE0292	674399	5921932	674399	5921932	Cerro Caracol	Deslizamiento de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
138	JE0293	674391	5921913	674391	5921913	Cerro Caracol	Deslizamiento de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.

Continúa en la página 127

Continuación del Anexo I

N°	NOMBRE	COORDENADAS UTM				SECTOR	TIPO RM	USO DEL PUNTO (ENTRENAM/PRUEBA)	REGISTRADO POR
		Iniciales		Usadas					
		ESTE	NORTE	ESTE	NORTE				
139	JE0294	674315	5921862	674315	5921862	Cerro Caracol	Deslizamiento de tierra	Prueba	GAJARDO, P. 2022.
140	JE0295	674310	5921846	674310	5921846	Cerro Caracol	Deslizamiento de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
141	JE0296	674383	5921336	674383	5921336	Cerro Caracol	Deslizamiento de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
142	JE0297	677168	5921920	677175	5921923	Los Lirios Alto	Deslizamiento de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
143	JE0298	677169	5921931	677169	5921931	Los Lirios Alto	Deslizamiento de tierra	Prueba	GAJARDO, P. 2022.
144	JE0299	677019	5921784	677019	5921784	Los Lirios Alto	Deslizamiento de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
145	JE0300	676861	5921855	676858	5921856	Los Lirios Alto	Deslizamiento de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
146	JE0301	676832	5921890	676832	5921890	Los Lirios Alto	Deslizamiento de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
147	JE0302	676948	5922208	676948	5922208	Los Lirios Alto	Deslizamiento de tierra	Prueba	GAJARDO, P. 2022.
148	JE0303	674651	5921669	674651	5921669	Aguíta de la Perdiz	Deslizamiento de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
149	JE0304	674621	5921655	674621	5921655	Aguíta de la Perdiz	Deslizamiento traslacional de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
150	JE0305	674611	5921660	674611	5921660	Aguíta de la Perdiz	Deslizamiento de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
151	JE0306	674706	5921696	674703	5921700	Aguíta de la Perdiz	Deslizamiento de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
152	JE0307	674488	5922014	674488	5922014	Cerro Caracol	Caída de roca	Prueba	GAJARDO, P. 2022.
153	JE0308	679470	5922762	679470	5922762	Palomares	Deslizamiento de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
154	JE0309	674628	5921697	674628	5921697	Aguíta de la Perdiz	Deslizamiento traslacional de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, P. 2022.
155	JE0325	677562	5921413	677562	5921413	Nonguén	Deslizamiento	Prueba	CREIXELL, C.; CANCINO, G. & RAMÍREZ, P. 2010.
156	JE0334	671776	5922898	671779	5922894	Cerro Chepe	Deslizamiento de tierra y roca	Entrenamiento	CREIXELL, C.; CANCINO, G. & RAMÍREZ, P. 2010.
157	JE0369	682735	5925238	682735	5925238	Villa Juan Riquelme	Deslizamiento traslacional de tierra	Entrenamiento	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J. & BALTIERRA, F. 2023.)
158	JE0370	682115	5925258	682119	5925248	Villa Juan Riquelme	Deslizamiento traslacional de tierra	Prueba	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J. & BALTIERRA, F. 2023.)
159	JE0371	680656	5924436	680656	5924436	San Valentín	Deslizamiento traslacional de tierra, rocas y escombros	Entrenamiento	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J. & BALTIERRA, F. 2023.)
160	JE0372	680647	5924441	680647	5924441	San Valentín	Flujo de barro	Prueba	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J. & BALTIERRA, F. 2023.)
161	JE0373	680631	5924444	680631	5924444	San Valentín	Deslizamiento traslacional de tierra	Entrenamiento	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J. & BALTIERRA, F. 2023.)
162	JE0374	680663	5924308	680658	5924307	San Valentín	Sin clasificación	Entrenamiento	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J. & BALTIERRA, F. 2023.)

Continúa en la página 128

Continuación del Anexo I

N°	NOMBRE	COORDENADAS UTM				SECTOR	TIPO RM	USO DEL PUNTO (ENTRENAM/PRUEBA)	REGISTRADO POR
		Iniciales		Usadas					
		ESTE	NORTE	ESTE	NORTE				
163	JE0375	678791	5922178	678782	5922177	Palomares	Deslizamiento	Entrenamiento	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J. & BALTIERRA, F. 2023.)
164	JE0376	679166	5922287	679166	5922287	Palomares	Deslizamiento traslacional de tierra	Entrenamiento	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J. & BALTIERRA, F. 2023.)
165	JE0377	677314	5920656	677314	5920656	Palomares	Deslizamiento traslacional de tierra	Prueba	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J. & BALTIERRA, F. 2023.)
166	JE0378	677300	5920532	677300	5920532	Palomares	Deslizamiento	Prueba	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J. & BALTIERRA, F. 2023.)
167	JE0379	677295	5920522	677295	5920522	Palomares	Deslizamiento	Entrenamiento	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J. & BALTIERRA, F. 2023.)
168	JE0380	677272	5920527	677272	5920527	Palomares	Deslizamiento	Entrenamiento	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J. & BALTIERRA, F. 2023.)
169	JE0381	677266	5920537	677266	5920537	Palomares	Deslizamiento traslacional de tierra y escombros	Entrenamiento	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J. & BALTIERRA, F. 2023.)
170	JE0382	677237	5920561	677237	5920561	Palomares	Deslizamiento traslacional de tierra	Entrenamiento	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J. & BALTIERRA, F. 2023.)
171	JE0383	677233	5920601	677233	5920601	Palomares	Deslizamiento traslacional de tierra	Entrenamiento	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J. & BALTIERRA, F. 2023.)
172	JE0384	678265	5920967	678265	5920967	Palomares	Deslizamiento traslacional de tierra	Prueba	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J. & BALTIERRA, F. 2023.)
173	JE0385	678472	5921430	678472	5921430	Palomares	Deslizamiento traslacional de tierra	Entrenamiento	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J. & BALTIERRA, F. 2023.)
174	JE0386	678517	5921476	678517	5921476	Palomares	Deslizamiento traslacional de tierra	Entrenamiento	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J. & BALTIERRA, F. 2023.)
175	JE0387	678395	5921522	678395	5921522	Palomares	Deslizamiento traslacional de tierra	Prueba	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J. & BALTIERRA, F. 2023.)
176	JE0388	678399	5921552	678399	5921552	Palomares	Deslizamiento traslacional de tierra	Entrenamiento	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J. & BALTIERRA, F. 2023.)
177	JE0389	678391	5921534	678391	5921534	Palomares	Deslizamiento traslacional de tierra	Prueba	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J. & BALTIERRA, F. 2023.)
178	JE0390	677228	5922077	677228	5922077	Los Lirios Alto	Deslizamiento traslacional de tierra	Entrenamiento	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J. & BALTIERRA, F. 2023.)
179	JE0391	676847	5922493	676847	5922493	Los Lirios Alto	Deslizamiento traslacional de tierra	Entrenamiento	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J. & BALTIERRA, F. 2023.)
180	JE0392	676276	5922486	676276	5922486	Collao	Deslizamiento traslacional de tierra	Entrenamiento	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J. & BALTIERRA, F. 2023.)
181	JE0393	676241	5923204	676241	5923204	Collao	Deslizamiento traslacional de tierra	Entrenamiento	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J. & BALTIERRA, F. 2023.)

Continúa en la página 129

Continuación del Anexo I

N°	NOMBRE	COORDENADAS UTM				SECTOR	TIPO RM	USO DEL PUNTO (ENTRENAM/PRUEBA)	REGISTRADO POR
		Iniciales		Usadas					
		ESTE	NORTE	ESTE	NORTE				
182	JE0394	679223	5922361	679223	5922361	Palomares	Deslizamiento	Prueba	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J. & BALTIERRA, F. 2023.)
183	JE0395	679145	5922567	679145	5922567	Palomares	Deslizamiento	Entrenamiento	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J. & BALTIERRA, F. 2023.)
184	JE0396	677587	5920237	677587	5920237	Nonguén	Deslizamiento traslacional de tierra y escombros	Entrenamiento	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J. & BALTIERRA, F. 2023.)
185	JE0398	674358	5925619	674358	5925619	Cerro Lo Galindo	Rock & Deslizamiento traslacional de tierra	Entrenamiento	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J. & BALTIERRA, F. 2023.)
186	JE0401	674313	5925633	674313	5925633	Cerro Lo Galindo	Rock & Deslizamiento traslacional de tierra	Entrenamiento	Terrenos Multiamenazas (CASTRO, F.; ESPINOZA, J. & BALTIERRA, F. 2023.)
187	JE0439	675369	5922236	675364	5922237	Universidad de Concepción	Deslizamiento traslacional de tierra	Entrenamiento	CASTRO, F. 2022. Polígonos por ESPINOZA, J. 2023.
188	JE0440	675208	5922833	675190	5922834	Cerro Lo Pequeñ	Deslizamiento traslacional de tierra	Prueba	ESPINOZA, J. 2023.
189	JE0441	675352	5922749	675301	5922759	Cerro Lo Pequeñ	Deslizamiento traslacional de tierra	Entrenamiento	ESPINOZA, J. 2023.
190	JE0442	675987	5923112	675987	5923112	Collao	Deslizamiento	Prueba	ESPINOZA, J. 2023.
191	JE0444	679357	5922873	679361	5922872	Av. España 30, Palomares	Deslizamiento	Entrenamiento	DEPARTAMENTO DE GESTIÓN DEL RIESGO EN EMERGENCIA DE LA MUNICIPALIDAD DE CONCEPCIÓN. 2022.
192	JE0445	679260	5922862	679258	5922866	Av. España 83, Palomares	Deslizamiento	Prueba	DEPARTAMENTO DE GESTIÓN DEL RIESGO EN EMERGENCIA DE LA MUNICIPALIDAD DE CONCEPCIÓN. 2022.
193	JE0446	679331	5922840	679324	5922858	Av. España 35A, Palomares	Deslizamiento	Prueba	DEPARTAMENTO DE GESTIÓN DEL RIESGO EN EMERGENCIA DE LA MUNICIPALIDAD DE CONCEPCIÓN. 2022.
194	JE0447	679332	5922867	679345	5922866	Av. España 31, Palomares	Deslizamiento	Entrenamiento	DEPARTAMENTO DE GESTIÓN DEL RIESGO EN EMERGENCIA DE LA MUNICIPALIDAD DE CONCEPCIÓN. 2022.
195	JE0449	679473	5922895	679473	5922895	Los Copihues 17, Palomares	Deslizamiento	Entrenamiento	DEPARTAMENTO DE GESTIÓN DEL RIESGO EN EMERGENCIA DE LA MUNICIPALIDAD DE CONCEPCIÓN. 2022.

Continúa en la página 130

Continuación del Anexo I

N°	NOMBRE	COORDENADAS UTM				SECTOR	TIPO RM	USO DEL PUNTO (ENTRENAM/PRUEBA)	REGISTRADO POR
		Iniciales		Usadas					
		ESTE	NORTE	ESTE	NORTE				
196	JE0450	675038	5921483	675038	5921483	Senda 1, Esfuerzo Alto, Aguita de La Perdiz	Deslizamiento	Prueba	DEPARTAMENTO DE GESTIÓN DEL RIESGO EN EMERGENCIA DE LA MUNICIPALIDAD DE CONCEPCIÓN. 2022.
197	JE0452	675055	5921278	675044	5921267	Esfuerzo Alto, Aguita de La Perdiz	Deslizamiento	Prueba	DEPARTAMENTO DE GESTIÓN DEL RIESGO EN EMERGENCIA DE LA MUNICIPALIDAD DE CONCEPCIÓN. 2022.
198	JE0453	674705	5921542	674705	5921542	Michimalongo 54, Aguita de La Perdiz	Deslizamiento	Entrenamiento	DEPARTAMENTO DE GESTIÓN DEL RIESGO EN EMERGENCIA DE LA MUNICIPALIDAD DE CONCEPCIÓN. 2022.
199	JE0454	675058	5921393	675081	5921404	El Esfuerzo 60, Aguita de La Perdiz	Deslizamiento	Entrenamiento	DEPARTAMENTO DE GESTIÓN DEL RIESGO EN EMERGENCIA DE LA MUNICIPALIDAD DE CONCEPCIÓN. 2022.
200	JE0456	674667	5921501	674683	5921495	Los Ciruelos 1, Aguita de La Perdiz	Deslizamiento	Entrenamiento	DEPARTAMENTO DE GESTIÓN DEL RIESGO EN EMERGENCIA DE LA MUNICIPALIDAD DE CONCEPCIÓN. 2022.
201	JE0457	691077	5923240	691079	5923208	Puente 5, Lomas de Andalién	Deslizamiento	Entrenamiento	DEPARTAMENTO DE GESTIÓN DEL RIESGO EN EMERGENCIA DE LA MUNICIPALIDAD DE CONCEPCIÓN. 2022.
202	JE0458	675283	5924542	675283	5924542	Cerro La Pólvara 2513	Deslizamiento	Prueba	DEPARTAMENTO DE GESTIÓN DEL RIESGO EN EMERGENCIA DE LA MUNICIPALIDAD DE CONCEPCIÓN. 2022.
203	JE0461	679373	5922849	679373	5922849	Av. España 34, Palomares	Deslizamiento	Prueba	DEPARTAMENTO DE GESTIÓN DEL RIESGO EN EMERGENCIA DE LA MUNICIPALIDAD DE CONCEPCIÓN. 2022.
204	JE0462	685205	5920633	685205	5920633	Sector El Pino	Deslizamiento	Prueba	DEPARTAMENTO DE GESTIÓN DEL RIESGO EN EMERGENCIA DE LA MUNICIPALIDAD DE CONCEPCIÓN. 2022.
205	JE0463	679461	5922990	679451	5922976	Parcela 17, Los Copihues	Deslizamiento	Prueba	DEPARTAMENTO DE GESTIÓN DEL RIESGO EN EMERGENCIA DE LA MUNICIPALIDAD DE CONCEPCIÓN. 2022.
206	JE0464	683629	5923688	683600	5923777	Sector San Jorge	Deslizamiento	Entrenamiento	DEPARTAMENTO DE GESTIÓN DEL RIESGO EN EMERGENCIA DE LA MUNICIPALIDAD DE CONCEPCIÓN. 2022.

Continúa en la página 131

Continuación del Anexo I

N°	NOMBRE	COORDENADAS UTM				SECTOR	TIPO RM	USO DEL PUNTO (ENTRENAM/PRUEBA)	REGISTRADO POR
		Iniciales		Usadas					
		ESTE	NORTE	ESTE	NORTE				
207	JE0465	675171	5921644	675155	5921607	Chorrillos 1169, Aguita de La perdiz	Deslizamiento	Entrenamiento	DEPARTAMENTO DE GESTIÓN DEL RIESGO EN EMERGENCIA DE LA MUNICIPALIDAD DE CONCEPCIÓN. 2022.
208	JE0467	679390	5922852	679390	5922852	Av. España 32, Palomares	Deslizamiento	Entrenamiento	DEPARTAMENTO DE GESTIÓN DEL RIESGO EN EMERGENCIA DE LA MUNICIPALIDAD DE CONCEPCIÓN. 2022.
209	JE0468	689444	5918821	689444	5918821	Chaimávida	Deslizamiento	Entrenamiento	DEPARTAMENTO DE GESTIÓN DEL RIESGO EN EMERGENCIA DE LA MUNICIPALIDAD DE CONCEPCIÓN. 2022.
210	JE0469	678519	5921550	678510	5921548	Las Palmas, Nonguén	Deslizamiento	Entrenamiento	DEPARTAMENTO DE GESTIÓN DEL RIESGO EN EMERGENCIA DE LA MUNICIPALIDAD DE CONCEPCIÓN. 2022.
211	JE0471	678222	5920987	678182	5920935	Los Rayitos 348, Nonguén	Deslizamiento	Prueba	DEPARTAMENTO DE GESTIÓN DEL RIESGO EN EMERGENCIA DE LA MUNICIPALIDAD DE CONCEPCIÓN. 2022.
212	JE0472	679381	5922857	679381	5922857	Av. España 34, Palomares	Deslizamiento	Entrenamiento	DEPARTAMENTO DE GESTIÓN DEL RIESGO EN EMERGENCIA DE LA MUNICIPALIDAD DE CONCEPCIÓN. 2022.
213	JE0473	679382	5922843	679382	5922843	Av. España 35, Palomares	Deslizamiento	Prueba	DEPARTAMENTO DE GESTIÓN DEL RIESGO EN EMERGENCIA DE LA MUNICIPALIDAD DE CONCEPCIÓN. 2022.
214	JE0474	679379	5922848	679379	5922848	Av. España 36, Palomares	Deslizamiento	Prueba	DEPARTAMENTO DE GESTIÓN DEL RIESGO EN EMERGENCIA DE LA MUNICIPALIDAD DE CONCEPCIÓN. 2022.
215	JE0475	674843	5921588	674847	5921579	Pje. El Sauce, atrás del colegio, Aguita de La Perdiz	Deslizamiento	Entrenamiento	DEPARTAMENTO DE GESTIÓN DEL RIESGO EN EMERGENCIA DE LA MUNICIPALIDAD DE CONCEPCIÓN. 2022.
216	JE0476	675285	5924548	675285	5924548	Villa Camilo Henriquez, Cerro La Pólvora	Deslizamiento	Entrenamiento	DEPARTAMENTO DE GESTIÓN DEL RIESGO EN EMERGENCIA DE LA MUNICIPALIDAD DE CONCEPCIÓN. 2022.
217	CHI00001	674873	5917940	674873	5917940	Lonco oriente	Deslizamiento rotacional de tierra	Prueba	GAJARDO, L. 2022.
218	CHI00002	674607	5917671	674607	5917671	Lonco oriente	Deslizamiento rotacional de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, L. 2022.
219	CHI00003	674601	5917591	674601	5917591	Villuco	Flujo de barro	Entrenamiento	GAJARDO, L. 2022.

Continúa en la página 132

Continuación del Anexo I

N°	NOMBRE	COORDENADAS UTM				SECTOR	TIPO RM	USO DEL PUNTO (ENTRENAM/PRUEBA)	REGISTRADO POR
		Iniciales		Usadas					
		ESTE	NORTE	ESTE	NORTE				
220	CHI00004	676220	5913490	676220	5913490	Villa Pinares	Deslizamiento rotacional de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, L. 2022.
221	CHI00005	677096	5908582	677096	5908582	Valle del Sol	Deslizamiento rotacional de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, L. 2022.
222	CHI00006	677476	5909600	677476	5909600	Villa Santo Domingo	Deslizamiento rotacional de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, L. 2022.
223	CHI00008	675192	5918040	675192	5918040	Lonco oriente	Flujo de barro	Prueba	GAJARDO, L. 2022.
224	CHI00009	676265	5912920	676265	5912920	Calle Arturo Prat	Flujo de escombros	Prueba	SERNAGEOMIN
225	CHI00010	676404	5912761	676404	5912761	Calle Ojeda	Deslizamiento rotacional de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, L. 2022.
226	CHI00011	676603	5913031	676603	5913031	Población Santa Elisa	Flujo de escombros	Entrenamiento	GAJARDO, L. 2022.
227	CHI00012	675007	5915760	675007	5915760	Villuco	Deslizamiento rotacional de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, L. 2022.
228	CHI00013	674663	5917331	674663	5917331	Lonco parque	Flujo de barro	Entrenamiento	GAJARDO, L. 2022.
229	CHI00014	676301	5912241	676301	5912241	Calle Cochrane	Flujo de barro	Entrenamiento	GAJARDO, L. 2022.
230	CHI00015	676594	5912151	676594	5912151	Poblacion papen	Deslizamiento rotacional de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, L. 2022.
231	CHI00016	676073	5912290	676073	5912290	Poblacion Alberto Bless Gana	Flujo de barro	Entrenamiento	GAJARDO, L. 2022.
232	CHI00017	676980	5911640	676980	5911640	Calle 18 de septiembre	Deslizamiento rotacional de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, L. 2022.
233	CHI00018	676276	5913300	676276	5913300	Poblacion San Martín	Flujo de barro	Entrenamiento	GAJARDO, L. 2022.
234	CHI00021	677167	5908603	677167	5908603	Valle la Piedra	Deslizamiento	Entrenamiento	SERNAGEOMIN
235	CHI00022	677416	5909096	677442	5909058	Valle del Sol	Deslizamiento	Prueba	SERNAGEOMIN
236	CHI00023	677298	5909195	677330	5909211	Valle del Sol	Deslizamiento	Entrenamiento	SERNAGEOMIN
237	CHI00028	676314	5917420	676314	5917420	Cantera	Deslizamiento	Entrenamiento	SERNAGEOMIN
238	CHI00030	674618	5917340	674618	5917340	Lonco parque	Flujo de barro	Prueba	GAJARDO, L. 2022.
239	CHI00031	676293	5914300	676293	5914300	A Colón	Deslizamiento rotacional de tierra	Prueba	GAJARDO, L. 2022.
240	CHI00032	676330	5912630	676328	5912630	Rene Schneider	Deslizamiento rotacional de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, L. 2022.
241	CHI00034	675302	5917121	675302	5917121	Vía del bosque	Deslizamiento rotacional de tierra	Entrenamiento	GAJARDO, L. 2022.
242	CHI00035	676428	5912848	676428	5912848	Arturo Prat	Flujo de escombros	Entrenamiento	SERNAGEOMIN
243	CHI00036	674546	5917450	674559	5917453	Lonco	Deslizamiento rotacional de tierra	Entrenamiento	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.

Continúa en la página 133

Continuación del Anexo I

N°	NOMBRE	COORDENADAS UTM				SECTOR	TIPO RM	USO DEL PUNTO (ENTRENAM/PRUEBA)	REGISTRADO POR
		Iniciales		Usadas					
		ESTE	NORTE	ESTE	NORTE				
244	CHI00037	677074	5908287	677074	5908287	Valle del Sol	Deslizamiento rotacional de tierra	Prueba	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.
245	CHI00038	677183	5908621	677183	5908621	Valle del Sol	Deslizamiento rotacional de tierra	Prueba	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.
246	CHI00039	677063	5908620	677063	5908620	Valle del Sol	Flujo de barro	Entrenamiento	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.
247	CHI00040	676158	5912181	676158	5912181	Calle cochrane	Deslizamiento rotacional de tierra	Entrenamiento	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.
248	CHI00041	675926	5912546	675926	5912546	Santa Sofia	Flujo de barro	Entrenamiento	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.
249	CHI00042	676049	5912545	676049	5912545	Santa Sofia	Deslizamiento rotacional de tierra	Entrenamiento	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.
250	CHI00043	676392	5912981	676392	5912981	Poblacion Santa Elisa	Deslizamiento rotacional de tierra	Entrenamiento	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.
251	CHI00044	676731	5913240	676731	5913240	Poblacion Santa Elisa	Deslizamiento rotacional de tierra	Entrenamiento	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.
252	CHI00045	676220	5914212	676220	5914212	Prolongacion Colón. Calle 2	Deslizamiento rotacional de tierra	Entrenamiento	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.
253	CHI00046	676280	5914127	676280	5914127	Prolongacion Colón. Calle 2 (cerro)	Deslizamiento rotacional de tierra	Entrenamiento	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.
254	CHI00047	676338	5914120	676338	5914120	Prolongacion Colón. Calle 2 (cerro)	Deslizamiento rotacional de tierra	Entrenamiento	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.
255	CHI00048	676479	5914140	676479	5914140	Prolongacion Colón. Calle 2 (cerro)	Deslizamiento rotacional de tierra	Entrenamiento	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.
256	CHI00049	675866	5916282	675861	5916279	Villuco	Deslizamiento rotacional de tierra	Entrenamiento	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.
257	CHI00050	676291	5917241	676291	5917241	La Cantera, Villuco	Deslizamiento rotacional de tierra	Entrenamiento	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.
258	CHI00051	675813	5918020	675813	5918020	La Cantera, Villuco	Deslizamiento rotacional de tierra	Entrenamiento	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.
259	HUA00052	681602	5906892	681579	5906938	Periquillo	Deslizamiento rotacional de tierra	Entrenamiento	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.
260	HUA00053	686490	5910380	686490	5910380	Los Placeres	Flujo de barro	Prueba	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.
261	HUA00054	686590	5909946	686590	5909946	La Leonera	Deslizamiento rotacional de tierra	Entrenamiento	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.
262	HUA00055	687210	5910628	687210	5910628	Los Placeres	Deslizamiento rotacional de tierra	Prueba	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.
263	HUA00056	687197	5910743	687197	5910743	Los Placeres	Deslizamiento rotacional de tierra	Entrenamiento	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.

Continúa en la página 134

Continuación del Anexo I

N°	NOMBRE	COORDENADAS UTM				SECTOR	TIPO RM	USO DEL PUNTO (ENTRENAM/PRUEBA)	REGISTRADO POR
		Iniciales		Usadas					
		ESTE	NORTE	ESTE	NORTE				
264	HUA00057	686601	5909891	686601	5909891	La Leonera	Deslizamiento rotacional de tierra	Entrenamiento	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.
265	HUA00058	686493	5909831	686493	5909831	La Leonera	Caída de roca	Prueba	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.
266	HUA00059	686308	5909672	686308	5909672	La Leonera	Flujo de barro	Entrenamiento	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.
267	HUA00060	683664	5889010	683664	5889010	Unihue	Deslizamiento rotacional de tierra	Entrenamiento	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.
268	HUA00061	680826	5899270	680830	5899285	Las Higueras	Deslizamiento rotacional de tierra	Entrenamiento	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.
269	HUA00062	680854	5899204	680854	5899204	Las Higueras	Deslizamiento de tierra en area múltiple	Entrenamiento	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.
270	HUA00063	680833	5898996	680845	5898998	Las Higueras	Flujo de barro	Prueba	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.
271	HUA00064	680880	5898652	680880	5898652	Las Higueras	Deslizamiento rotacional de tierra	Prueba	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.
272	HUA00065	686237	5902015	686237	5902015	Camino Bulnes	Deslizamiento rotacional de tierra	Entrenamiento	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.
273	HUA00066	686440	5901439	686440	5901439	Camino Bulnes	Deslizamiento rotacional de tierra	Prueba	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.
274	HUA00067	687595	5901374	687595	5901374	Camino Bulnes	Deslizamiento rotacional de tierra	Entrenamiento	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.
275	HUA00068	688652	5896211	688652	5896211	-	Deslizamiento rotacional de tierra	Prueba	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.
276	HUA00069	688583	5895774	688583	5895774	-	Caída de roca	Prueba	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.
277	HUA00070	688694	5895638	688694	5895638	-	Deslizamiento rotacional de tierra	Prueba	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.
278	HUA00071	688753	5896061	688753	5896061	-	Deslizamiento rotacional de tierra	Entrenamiento	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.
279	HUA00072	688752	5896116	688752	5896116	-	Deslizamiento rotacional de tierra	Entrenamiento	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.
280	HUA00073	688807	5896446	688807	5896446	-	Flujo de barro	Entrenamiento	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.
281	HUA00074	688727	5896607	688727	5896607	-	Deslizamiento rotacional de tierra	Prueba	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.
282	HUA00075	686921	5901722	686921	5901722	Camino Bulnes	Deslizamiento rotacional de tierra	Prueba	CASTRO, F. Puntos y polígonos por PINO, F.

Anexo II: Inventario propio de puntos de remociones en masa. Amarillo: comuna de Concepción; verde: comuna de Chiguayante; azul: comuna de Hualqui. Elaboración propia, en base a datos registrados en Google Earth Pro.

N°	NOMBRE	COORDENADAS UTM				SECTOR	TIPO APARENTE RM	CONFIABLE	USO DEL PUNTO (ENTRENAM/PRUEBA)	COMENTARIOS
		Iniciales		Usadas						
		ESTE	NORTE	ESTE	NORTE					
0	FB0001	692862	5881297	692862	5881297	Gomero	Deslizamiento de tierra	Definitiva	Entrenamiento	Punto presenta actividad recurrente desde el 2004.
1	FB0002	692661	5882108	692661	5882108	Gomero	Deslizamiento de tierra	Probable	Prueba	Posible, debido a la pendiente, poca vegetación y riesgo de casas.
2	FB0003	692727	5882154	692727	5882154	Gomero	Deslizamiento de tierra	Probable	Entrenamiento	Posible, debido a la pendiente, poca vegetación y riesgo de casas.
3	FB0004	694447	5883981	694447	5883981	Río Gomero	Deslizamiento de tierra	Probable	Entrenamiento	El punto posee periodos de años con vegetación variable. El incremento de escarpe propio de un deslizamiento se observa en octubre de 2018 y noviembre de 2021.
4	FB0005	694491	5884113	694486	5884114	Río Gomero	Deslizamiento de tierra	Probable	Entrenamiento	Se observa posible actividad desde el 2019.
5	FB0006	697750	5887207	697757	5887214	Río Gomero	Deslizamiento de tierra	Probable	Prueba	Existe una pendiente inclinada con periodos breves de vegetación, pero que, en su mayoría, está expuesto el material.
6	FB0007	695366	5892757	695366	5892757	Peralillo	Deslizamiento de tierra	Cuestionable	Entrenamiento	No se reconoce si es una remoción o solo excavación. El cambio ocurre en 2015.
7	FB0008	694804	5903373	694804	5903373	Estero San Pablo	Deslizamiento de tierra	Probable	Entrenamiento	Registra actividad desde el 2023.
8	FB0009	694839	5903272	694839	5903272	Estero San Pablo	Deslizamiento de tierra	Probable	Entrenamiento	Registra actividad desde el 2023.
9	FB0010	693234	5903422	693234	5903422	Estero Milahue	Deslizamiento de tierra	Cuestionable	Prueba	No queda claro si es remoción o excavación.
10	FB0011	693030	5903562	693030	5903562	Estero Milahue	Deslizamiento de tierra	Cuestionable	Prueba	No queda claro si es remoción o excavación.
11	FB0012	689791	5903635	689791	5903635	Camino forestal	Deslizamiento de tierra	Definitiva	Prueba	Inicio antes de abril del 2021.
12	FB0013	689783	5903679	689783	5903679	Camino forestal	Deslizamiento de tierra	Definitiva	Entrenamiento	En octubre de 2018 se observa el movimiento abrupto de tierra más reciente, visible por la coloración del terreno. Antes de noviembre de 2008 se observan deslizamientos de mayor tamaño.

Continúa en la página 136

Continuación del Anexo II

N°	NOMBRE	COORDENADAS UTM				SECTOR	TIPO APARENTE RM	CONFIABLE	USO DEL PUNTO (ENTRENAM/PRUEBA)	COMENTARIOS
		Iniciales		Usadas						
		ESTE	NORTE	ESTE	NORTE					
13	FB0014	683615	5929081	683615	5929081	Camino forestal	Deslizamiento de tierra	Probable	Prueba	Inicio en 2021.
14	FB0016	681647	5928641	681647	5928641	Camino forestal	Deslizamiento de tierra	Cuestionable	Entrenamiento	Se ve una pendiente inclinada desde años, pero a partir de junio de 2021 se observa material aparentemente removido. Puede ser un deslizamiento o un camino de tierra.
15	FB0017	681987	5928700	681987	5928700	Camino forestal	Deslizamiento de tierra	Probable	Entrenamiento	La ladera se encuentra muy inclinada, y posee años (2009, 2014, 2020, 2022 y 2023) con material aparentemente removido.
16	FB0018	681948	5928577	681948	5928577	Camino forestal	Deslizamiento de tierra	Definitiva	Entrenamiento	Aparece desde agosto del 2022.
17	FB0019	681886	5928612	681886	5928612	Camino forestal	Deslizamiento de tierra	Probable	Prueba	Aparece desde agosto del 2022.
18	FB0020	682074	5928512	682074	5928512	Camino forestal	Deslizamiento de tierra	Probable	Entrenamiento	Aparece desde agosto del 2022.
19	FB0021	681045	5927787	681045	5927787	Camino forestal	Deslizamiento de tierra	Definitiva	Entrenamiento	Deslizamiento aparentemente activo. Última remoción fuerte fue antes de febrero de 2020.
20	FB0022	676942	5926839	676935	5926833	Wessex School	Deslizamiento de tierra	Probable	Entrenamiento	Deslizamiento desde enero del 2022.
21	FB0023	677008	5926942	677008	5926942	Wessex School	Deslizamiento de tierra	Probable	Entrenamiento	Deslizamiento desde enero del 2022.
22	FB0024	676760	5926679	676760	5926679	Los Naranjos, Camino a Penco	Deslizamiento de tierra	Probable	Entrenamiento	Desde marzo del 2020 se observa un mayor deslizamiento.
23	FB0025	674936	5925801	674927	5925800	Laguna Lo Galindo	Deslizamiento de tierra	Definitiva	Entrenamiento	Desde marzo del 2020 se observa un mayor deslizamiento.
24	FB0026	674995	5925893	674995	5925893	Laguna Lo Galindo	Deslizamiento de tierra	Probable	Entrenamiento	En marzo de 2020 y enero de 2022 se ve un deslizamiento de tierra menor.

Continúa en la página 137

Continuación del Anexo II

N°	NOMBRE	COORDENADAS UTM				SECTOR	TIPO APARENTE RM	CONFIABLE	USO DEL PUNTO (ENTRENAM/PRUEBA)	COMENTARIOS
		Iniciales		Usadas						
		ESTE	NORTE	ESTE	NORTE					
25	FB0027	677283	5923936	677283	5923936	Collao	Deslizamiento de tierra	Probable	Entrenamiento	Se observa un claro socavamiento de una ladera desde abril del 2023.
26	FB0028	679428	5917880	679428	5917880	Camino forestal	Deslizamiento de tierra	Probable	Entrenamiento	Se alcanza a ver un deslizamiento que empieza desde el julio de 2019. El camino se empezó a crear en 2016.
27	FB0029	679421	5917922	679421	5917922	Camino forestal	Deslizamiento de tierra	Probable	Entrenamiento	Se alcanza a ver un deslizamiento que empieza desde el julio de 2019. El camino se empezó a crear en 2016.
28	FB0030	677216	5920029	677216	5920029	Camino forestal	Deslizamiento de tierra	Probable	Entrenamiento	Empieza a haber movimiento en junio de 2016.
29	FB0031	677212	5920144	677212	5920144	Camino forestal	Deslizamiento de tierra	Probable	Prueba	Empieza a haber movimiento en junio de 2016.
30	FB0032	676295	5920673	676295	5920673	Camino forestal	Deslizamiento de tierra	Probable	Prueba	Empieza a haber movimiento en junio de 2016.
31	FB0033	675038	5919302	675038	5919302	Cercanías del Cerro Caracol	Deslizamiento de tierra	Probable	Entrenamiento	Empieza a haber movimiento en 2020.
32	FB0034	675663	5918064	675663	5918064	La Cantera, Villuco	Deslizamiento de tierra	Probable	Prueba	Actualmente es visible este deslizamiento de tierra.
33	FB0036	674522	5919761	674527	5919760	Avenida Francesa	Deslizamiento de tierra	Definitiva	Entrenamiento	Remoción en masa cerro abajo producto de la vegetación, material aparentemente arcilloso o maicillado, y el cual se sigue inclinando visto por los árboles ladeados. No hay acceso directo, solo visto a distancia.
34	FB0037	686622	5909991	686611	5909999	Camino forestal	Deslizamiento de tierra	Definitiva	Prueba	Deslizamiento a un lado del camino. Relativamente pequeño y afectado por el corte de camino, y por la vegetación.

Continúa en la página 138

Continuación del Anexo II

N°	NOMBRE	COORDENADAS UTM				SECTOR	TIPO APARENTE RM	CONFIABLE	USO DEL PUNTO (ENTRENAM/PRUEBA)	COMENTARIOS
		Iniciales		Usadas						
		ESTE	NORTE	ESTE	NORTE					
35	FB0038	689264	5905778	689264	5905778	Camino forestal	Deslizamiento de tierra	Definitiva	Entrenamiento	Deslizamiento a un lado del camino. Relativamente pequeño y afectado por el corte de camino, y por la vegetación.
36	FB0039	687827	5900064	687827	5900064	Camino a Bulnes	Caída de roca	Probable	Prueba	Bloques de roca alterada a un costado de camino.
37	FB0040	677140	5908615	677140	5908615	Valle del Sol	Deslizamiento de tierra	Definitiva	Prueba	Históricamente, acá había un registro de remociones en masa. El año 2021 se deslizó. Está generalmente cubierto de vegetación.
38	FB0041	677036	5910558	677044	5910557	Curva San Martín y El Maitén	Deslizamiento de tierra	Definitiva	Entrenamiento	Deslizamiento atrás de una casa. Se trató de hablar con los residentes pero no se encontraban.
39	FB0042	675989	5914219	675987	5914224	Prolongación Colón	Deslizamiento de tierra	Definitiva	Entrenamiento	Remoción producto de la urbanización de la zona. De hecho, el pavimento se veía bastante sucio del material de esta remoción.
40	FB0043	676089	5914295	676089	5914295	Prolongación Colón	Deslizamiento de tierra	Definitiva	Prueba	Producto del agua en esta zona, se va removiendo material constantemente en esta zona.
41	FB0044	676149	5914272	676149	5914272	Prolongación Colón	Deslizamiento de tierra	Definitiva	Entrenamiento	Lo que se muestra en la foto es lo que pasó a través del movimiento de hacer los cortafuegos, fue una mala gestión. Primera caída del muro fue en 2012 y empezó a caer una vertiente, que hasta el día de hoy está presente.
42	FB0045	676179	5914229	676179	5914229	Prolongación Colón	Deslizamiento de tierra	Probable	Entrenamiento	Pequeño deslizamiento de tierra en forma de abanico.
43	FB0046	682426	5924996	682426	5924996	Villa Juan Riquelme	Deslizamiento de tierra	Definitiva	Prueba	Último deslizamiento de tierra fue hace unos 4 años atrás. Ahora está la tierra asentada por los pinos y vegetación.

Continúa en la página 139

Continuación del Anexo II

N°	NOMBRE	COORDENADAS UTM				SECTOR	TIPO APARENTE RM	CONFIABLE	USO DEL PUNTO (ENTRENAM/PRUEBA)	COMENTARIOS
		Iniciales		Usadas						
		ESTE	NORTE	ESTE	NORTE					
44	FB0047	680681	5924457	680681	5924457	San Valentín	Deslizamiento de tierra	Definitiva	Entrenamiento	Bajo el gran deslizamiento más arriba, está este más pequeño al lado del camino de tierra.
45	FB0048	679662	5923175	679662	5923175	Palomares	Deslizamiento de tierra	Probable	Prueba	Pequeña remoción de tierra en el punto inicial del camino de tierra cuesta arriba.

Anexo III: Tabla de cálculo de FR, RF y PR de cada parámetro. Elaboración propia.

Parámetro	Clases	Píxeles de clases	%Píxeles de clases	Píxeles de RM	%Píxeles de RM	FR	RF	RF (non%)	RF (INT)	Min RF	Max RF	Max-Min RF	(Max-Min) Min RF	PR
Grado de la pendiente	<5°	1134048	22,457	8	4,103	0,18	0,023	2,322	2					
	5°-15°	2401203	47,550	53	27,179	0,57	0,073	7,264	7					
	15°-25°	1331290	26,363	97	49,744	1,89	0,240	23,979	23					
	>25°	183289	3,630	37	18,974	5,23	0,664	66,435	66					
Total		5049830		195		7,87				0,023	0,664	0,641	0,163	3,940
Parámetro	Clases	Píxeles de clases	%Píxeles de clases	Píxeles de RM	%Píxeles de RM	FR	RF	RF (non%)	RF (INT)	Min RF	Max RF	Max-Min RF	(Max-Min) Min RF	PR
Orientación de la pendiente	Plano (-1)	354557	7,021	1	0,513	0,07	0,008	0,845	0					
	Norte (337.5-22.5)	536465	10,623	23	11,795	1,11	0,129	12,852	12					
	Noreste (22.5-67.5)	574483	11,376	15	7,692	0,68	0,078	7,827	7					
	Este (67.5-112.5)	569050	11,269	18	9,231	0,82	0,095	9,482	9					
	Sureste (112.5-157.5)	525323	10,403	30	15,385	1,48	0,171	17,119	17					
	Sur (157.5-202.5)	544352	10,780	19	9,744	0,90	0,105	10,463	10					
	Suroeste (202.5-247.5)	674281	13,353	22	11,282	0,84	0,098	9,781	9					
	Oeste (247.5-292.5)	675401	13,375	35	17,949	1,34	0,155	15,534	15					
	Noroeste (292.5-337.5)	595918	11,801	32	16,410	1,39	0,161	16,097	16					
Total		5049830		195		8,64				0,008	0,171	0,163	0,163	1,000
Parámetro	Clases	Píxeles de clases	%Píxeles de clases	Píxeles de RM	%Píxeles de RM	FR	RF	RF (non%)	RF (INT)	Min RF	Max RF	Max-Min RF	(Max-Min) Min RF	PR
Elevación	<40 msnm	93544	1,852	1	0,513	0,28	0,023	2,252	2					
	40-60 msnm	273396	5,414	28	14,359	2,65	0,216	21,578	21					
	60-80 msnm	420201	8,321	62	31,795	3,82	0,311	31,086	31					
	80-100 msnm	266097	5,269	46	23,590	4,48	0,364	36,421	36					
	100-200 msnm	1671385	33,098	49	25,128	0,76	0,062	6,177	6					
	200-300 msnm	1839660	36,430	5	2,564	0,07	0,006	0,573	0					
	300-400 msnm	440483	8,723	4	2,051	0,24	0,019	1,913	1					
	>400 msnm	45064	0,892	0	0,000	0,00	0,000	0,000	0					
Total		5049830		195		12,29				0,000	0,364	0,364	0,163	2,238
Parámetro	Clases	Píxeles de clases	%Píxeles de clases	Píxeles de RM	%Píxeles de RM	FR	RF	RF (non%)	RF (INT)	Min RF	Max RF	Max-Min RF	(Max-Min) Min RF	PR
Curvatura	< (-)2	81609	1,616	3	1,538	0,95	0,228	22,841	22					
	(-)2 - (+)2	4898623	97,006	186	95,385	0,98	0,236	23,593	23					
	> (+)2	69598	1,378	6	3,077	2,23	0,536	53,566	53					
Total		5049830		195		4,17				0,228	0,536	0,307	0,163	1,888

Continúa en la página 141

Continuación del Anexo III

Parámetro	Clases	Píxeles de clases	%Píxeles de clases	Píxeles de RM	%Píxeles de RM	FR	RF	RF (non%)	RF (INT)	Min RF	Max RF	Max-Min RF	(Max-Min) Min RF	PR
Litología inicial	Batolito Costero del Sur	3380595	66,945	149	76,410	1,14	0,061	6,078	6					
	Depósitos cuaternarios	676398	13,394	31	15,897	1,19	0,063	6,320	6					
	Fm Quiriquina	5532	0,110	3	1,538	14,04	0,748	74,782	74					
	Fm Curanilahue	18192	0,360	1	0,513	1,42	0,076	7,580	7					
	Fm Andalién	4915	0,097	0	0,000	0,00	0,000	0,000	0					
	Serie Oriental	190856	3,779	6	3,077	0,81	0,043	4,335	4					
	Fm Santa Juana	761594	15,082	5	2,564	0,17	0,009	0,905	0					
Fm Huachipato	11748	0,233	0	0,000	0,00	0,000	0,000	0						
Total		5049830		195		18,78				0,000	0,748	0,748	0,163	4,595
Parámetro	Clases	Píxeles de clases	%Píxeles de clases	Píxeles de RM	%Píxeles de RM	FR	RF	RF (non%)	RF (INT)	Min RF	Max RF	Max-Min RF	(Max-Min) Min RF	PR
Litología final usada	Batolito Costero del Sur	3380595	66,945	149	76,410	1,14	0,149	14,864	14					
	Depósitos fluviales	676398	13,394	31	15,897	1,19	0,155	15,454	15					
	Fm Quiriquina/Fm Curanilahue	23724	0,470	4	2,051	4,37	0,569	56,861	56					
	Fm Andalién	4915	0,097	0	0,000	0,00	0,000	0,000	0					
	Serie Oriental	190856	3,779	6	3,077	0,81	0,106	10,608	10					
	Fm Santa Juana	761594	15,082	5	2,564	0,17	0,022	2,214	2					
	Fm Huachipato	11748	0,233	0	0,000	0,00	0,000	0,000	0					
Total		5049830		195		7,68				0,000	0,569	0,569	0,163	3,494
Parámetro	Clases	Píxeles de clases	%Píxeles de clases	Píxeles de RM	%Píxeles de RM	FR	RF	RF (non%)	RF (INT)	Min RF	Max RF	Max-Min RF	(Max-Min) Min RF	PR
Distancia a redes de drenaje	<50m	2512865	49,761	63	32,308	0,65	0,086	8,639	8					
	50-100m	1305928	25,861	47	24,103	0,93	0,124	12,402	12					
	100-150m	514310	10,185	29	14,872	1,46	0,194	19,430	19					
	150-200m	222099	4,398	24	12,308	2,80	0,372	37,236	37					
	>200m	494628	9,795	32	16,410	1,68	0,223	22,293	22					
Total		5049830		195		7,52				0,086	0,372	0,286	0,163	1,757
Parámetro	Clases	Píxeles de clases	%Píxeles de clases	Píxeles de RM	%Píxeles de RM	FR	RF	RF (non%)	RF (INT)	Min RF	Max RF	Max-Min RF	(Max-Min) Min RF	PR
Uso/coertura de suelo	Bosque nativo	399954	7,920	8	4,103	0,52	0,068	6,780	6					
	Plantaciones forestales	2793914	55,327	82	42,051	0,76	0,099	9,948	9					
	Matorrales	666919	13,207	36	18,462	1,40	0,183	18,296	18					
	Áreas agrícolas	911507	18,050	27	13,846	0,77	0,100	10,040	10					
	Áreas urbanas	259130	5,131	42	21,538	4,20	0,549	54,936	54					
	Humadales	13966	0,277	0	0,000	0,00	0,000	0,000	0					

Continúa en la página 142

Continuación del Anexo III

	Cuerpos de agua	4440	0,088	0	0,000	0,00	0,000	0,000	0					
Total		5049830		195		7,64				0,000	0,549	0,549	0,163	3,376
Parámetro	Clases	Píxeles de clases	%Píxeles de clases	Píxeles de RM	%Píxeles de RM	FR	RF	RF (non%)	RF (INT)	Min RF	Max RF	Max-Min RF	(Max-Min) Min RF	PR
Densidad de lineamientos propios	0 - 0,187 sq/km	690601	13,676	23	11,795	0,86	0,117	11,744	11					
	0,187 - 0,450 sq/km	735990	14,575	54	27,692	1,90	0,259	25,872	25					
	0,450 - 0,687 sq/km	844479	16,723	47	24,103	1,44	0,196	19,625	19					
	0,687 - 0,925 sq/km	802407	15,890	36	18,462	1,16	0,158	15,820	15					
	0,925 - 1,150 sq/km	705905	13,979	18	9,231	0,66	0,090	8,992	8					
	1,150 - 1,375 sq/km	511329	10,126	10	5,128	0,51	0,069	6,896	6					
	1,375 - 1,625 sq/km	352090	6,972	4	2,051	0,29	0,040	4,006	4					
	1,625 - 1,887 sq/km	219928	4,355	0	0,000	0,00	0,000	0,000	0					
	1,887 - 2,275 sq/km	150179	2,974	3	1,538	0,52	0,070	7,044	7					
2,275 - 3,188 sq/km	36922	0,731	0	0,000	0,00	0,000	0,000	0						
Total		5049830		195		7,34				0,000	0,259	0,259	0,163	1,590
Parámetro	Clases	Píxeles de clases	%Píxeles de clases	Píxeles de RM	%Píxeles de RM	FR	RF	RF (non%)	RF (INT)	Min RF	Max RF	Max-Min RF	(Max-Min) Min RF	PR
Densidad de fallas/lineamientos Geología de Campo II	0 - 0,105 sq/km	3134898	62,079	26	13,333	0,21	0,007	0,678	0					
	0,105 - 0,301 sq/km	323591	6,408	18	9,231	1,44	0,045	4,549	4					
	0,301 - 0,474 sq/km	413070	8,180	33	16,923	2,07	0,065	6,534	6					
	0,474 - 0,632 sq/km	614727	12,173	41	21,026	1,73	0,055	5,455	5					
	0,632 - 0,783 sq/km	160416	3,177	20	10,256	3,23	0,102	10,197	10					
	0,783 - 0,941 sq/km	148888	2,948	8	4,103	1,39	0,044	4,395	4					
	0,941 - 1,122 sq/km	121857	2,413	18	9,231	3,83	0,121	12,081	12					
	1,122 - 1,348 sq/km	60675	1,202	17	8,718	7,26	0,229	22,915	22					
	1,348 - 1,597 sq/km	40797	0,808	6	3,077	3,81	0,120	12,028	12					
1,597 - 1,921 sq/km	30911	0,612	8	4,103	6,70	0,212	21,167	21						
Total		5049830		195		31,66				0,007	0,229	0,222	0,163	1,366
Parámetro	Clases	Píxeles de clases	%Píxeles de clases	Píxeles de RM	%Píxeles de RM	FR	RF	RF (non%)	RF (INT)	Min RF	Max RF	Max-Min RF	(Max-Min) Min RF	PR
Densidad de fallas/lineamientos Geología de Campo II + Lineamientos propios	0 - 0,328 sq/km	551590	10,923	8	4,103	0,38	0,032	3,250	3					
	0,328 - 0,671 sq/km	1010479	20,010	26	13,333	0,67	0,058	5,765	5					
	0,671 - 0,952 sq/km	948776	18,788	42	21,538	1,15	0,099	9,918	9					
	0,952 - 1,218 sq/km	887172	17,568	40	20,513	1,17	0,101	10,102	10					
	1,218 - 1,499 sq/km	650750	12,887	26	13,333	1,03	0,090	8,952	8					
	1,499 - 1,812 sq/km	457010	9,050	16	8,205	0,91	0,078	7,844	7					
	1,812 - 2,155 sq/km	267901	5,305	18	9,231	1,74	0,151	15,054	15					
	2,155 - 2,577 sq/km	156033	3,090	8	4,103	1,33	0,115	11,487	11					
	2,577 - 3,124 sq/km	89201	1,766	11	5,641	3,19	0,276	27,629	27					
3,124 - 3,983 sq/km	30918	0,612	0	0,000	0,00	0,000	0,000	0						
Total		5049830		195		11,56				0,000	0,276	0,276	0,163	1,698