



ESCUELA DE
GEOLOGÍA

**EFFECTO DEL FACTOR ANTRÓPICO COMO CONDICIONANTE EN LA
GÉNESIS DE ALUVIONES Y METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN
DE SUSCEPTIBILIDAD DE FLUJOS DE DETRITOS:
UNA PERSPECTIVA GEOLÓGICA DEL ANTROPOCENO EN EL
SURORIENTE DE SANTIAGO, CHILE (33°30' - 33°40'S)**

Memoria entregada a la Universidad Mayor en cumplimiento de los requisitos para optar
al Título de Geólogo

JORGE VÍCTOR AMESTOY HERRERA

Profesor guía:

CAMILO EMANNUEL SÁNCHEZ YÁÑEZ

Miembros de la Comisión Evaluadora de Examen:

CRISTINA ORTEGA CAURAPÁN

RODRIGO PÉREZ GARAY

Santiago, Chile

JULIO, 2023

Resumen

EFECTO DEL FACTOR ANTRÓPICO COMO CONDICIONANTE EN LA GÉNESIS DE REMOCIONES EN MASA Y METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD DE FLUJOS DE DETRITOS

J. AMESTOY¹; ¹Universidad Mayor, Escuela de Geología. Manuel Montt 367, Chile (jorge.amestoy@mayor.cl)

En América del Sur se han identificado procesos de expansión inmobiliaria desde aproximadamente 1960, con un aumento demográfico exponencial en las grandes urbes del continente. En Chile Central, ciudades tales como Viña del Mar, Santiago o Rancagua presentan un crecimiento exponencial del uso de suelo urbano desde 1985 aproximadamente, cumpliendo con procesos de industrialización, urbanización descentralizada e impactos naturales. Estos fenómenos urbanos identificados desde mediados del siglo XX son característicos por su impacto tanto directo como indirecto a los ciclos naturales geológicos y climatológicos del sector. Tomando en cuenta que el territorio sudamericano y chileno en general es propenso a sufrir eventos de peligro de gran magnitud, la culturización nacional de prevención de la población chilena ha sido deficiente, marcando claros procesos de expansión hacia zonas estudiadas y catalogadas como altas en peligro y riesgo geológico con el paso de los años, principalmente sectores piemontinos localizados tanto en la Precordillera de los Andes y en otros faldeos de geomorfologías estructurales.

El estudio de los procesos de desestabilización de laderas naturales ha ido en avance, desarrollando diferentes metodologías para el análisis de susceptibilidad de procesos principalmente gravitatorios y fluviales, contemplando diferentes factores geológicos gatillantes y condicionantes. El avance exponencial de los procesos urbanos se presenta en el último tiempo como una variable relevante de modificación de procesos geológicos, y esto se ha visto integrado en diferentes actualizaciones a las metodologías antiguas, tratando de sopesar el avance del impacto humano definido formalmente como un evento geológico en el registro.

Si bien el factor antrópico ha sido investigado y definido exhaustivamente como un factor condicionante para la génesis de remociones en masa o desestabilización de laderas de forma general, los resultados y los productos geocientíficos han quedado subestimados por el gran avance del ser humano como variable natural.

Distintos autores han evaluado la susceptibilidad de remociones en masa con metodologías que ponderan al factor antrópico con una categoría secundaria, logrando detectar unidades geomorfológicas potencialmente inestables, pero subestimando el peligro de algunas laderas. Este estudio complementa a las metodologías utilizadas con un apéndice de análisis del factor antrópico y reponderación de la variable con aplicación en Quebrada Tarapacá – Santa Rosa, ubicada en comuna de La Florida, generando finalmente una actualización a la metodología de análisis de índice de susceptibilidad de desestabilización de laderas propuesto por Lara y Sepúlveda (2010), recalculando los índices previos con propuestas formales de actualización a las fórmulas preliminares, con un enfoque directo al análisis y definición de la estimación del factor humano como agente en las remociones en masa de tipo flujo, es decir, un análisis individual del impacto humano en el efecto condicionante de humedad; clima; geotecnia y antecedentes.

Este estudio presenta un análisis exhaustivo del impacto humano en la geología y las definiciones formales de este evento, como un sustento bibliográfico para la actualización de los factores condicionantes de flujos de detritos propuestos formalmente por Lara y Sepúlveda (2010), generando diferentes propuestas de revalorización de los factores con la finalidad de identificar una formulación y conceptualización objetiva y no subestimativa. Las 3 formulaciones propuestas por este estudio basadas en la referencia del efecto del factor antrópico como condicionantes en los procesos geológicos de remociones en masa entrega 4 mapas de índice de susceptibilidad de desestabilización de laderas para la Quebrada Tarapacá - Santa Rosa, utilizando preliminarmente las formulaciones originales como producto comparativo para la definición de subestimación o sobrestimación de factores.

La base de datos geológica respecto a las características de la cuenca para las 4 formulaciones utilizadas entrega una susceptibilidad alta de flujos de detritos para el sector bajo y central de la cuenca en estudio, mientras que el índice de cabecera es principalmente alto a muy alto, señalado por las condiciones geomorfológicas de laderas escarpadas y con baja estabilidad geotécnica característica de los depósitos aluviales. El índice de la cuenca en las zonas bajas presenta un aporte principalmente por el efecto antrópico en las condiciones de geotécnicas de las laderas, siendo definidas como laderas críticas por el impacto antrópico presente.

En base a las reformulaciones, se puede apreciar una variación entre los 4 índices de susceptibilidad calculados, donde la primera formulación se presenta como el cálculo más objetivo respecto a la formulación original de Lara y Sepúlveda (2010). Si bien los datos entregados pueden ser considerados subestimaciones forzadas, el rango de interpolación de datos presenta consistencias y similitudes importantes respecto a la formulación original, por lo que al menos 1 de las propuestas de actualización es válida para el reanálisis de la susceptibilidad de desestabilización de laderas en procesos de remociones en masa.

Dedicatoria

SOLO USO ACADÉMICO

“A mi madre, Mónica Herrera Contreras y a mi padre, Jorge Amestoy Balladares”

Agradecimientos

Quisiera agradecer en totalidad a la Universidad Mayor Campus Santiago y a la parrilla de funcionarios que trabajan para las diferentes sedes, los cuales mantienen correctamente y con dedicación el orden y resguardo de las instalaciones para que nosotros como estudiantes podamos disfrutar con comodidad la persecución de nuestros horizontes científicos. Quiero expresar formalmente también mi gratitud hacia la Escuela de Geología de la Universidad Mayor por haberme entregado un pensamiento geológico crítico y darme siempre la libertad de poner en práctica mis propios pensamientos. Agradezco profundamente a la planta de trabajadores que pasaron por la Escuela desde mi ingreso, probablemente no estaría escribiendo esto si no fuese por el esfuerzo diario que hacen para alimentar nuestra vocación a la Ciencia. De forma más cercana a todos mis mentores, quisiera poder alcanzar algún día vuestra grandeza y dedicación.

Quiero agradecer a mi profesor guía Camilo Sánchez, por haber confiado en mi idea y seleccionarme para su equipo de investigación del impacto antrópico en la Geología. De seguro que de escuchar tanta posibilidad de resultados geológicos mezclados con números y variables nuevas le freí el cerebro así que ocupó este espacio para pedirle mis disculpas públicas y decirle que yo le pago el neurólogo. Agradecer también a los geólogos Rodrigo Pérez y Marisol Lara por orientarme y ordenarme en la creación de este estudio, valoro profundamente la sabiduría y tiempo que me entregaron. Agradezco al querido equipo de tesis de Geología Ambiental que también tuvieron que pasar por el infierno de escuchar mi parloteo. Valoro mucho vuestra sinceridad respecto a mis ideas y conceptualización, destrabaron de mi cabeza muchos nudos científicos que me surgieron al realizar la tesis, los quiero infinito mis aguas. Agradecer a mis queridos geólogos Nicole R.; Macarena I.; Daniela A.; Andrés V.; Darío F.; Sebastián S.; Gonzalo M.; Raúl A.; Pablo M.; Sebastián C.; Camila S.; Jorge G.; Matías H.; Ignacio A.; Valentina C.; Javier M., Paula Z. y Christina B, los adoro. Agradecer obviamente a mis amigos de toda la vida Marce; Lucho; Vitorio; Cataluña; Tío; Nieto; Sheiver; la Iva. Gracias a Benjita: Franchi; Francia; Julius; Pipe; Sigri y Amber; Diego y Luis, no estaría en este lugar sin ustedes.

Agradecer a mi querida Madre por siempre quererme, aguantarme y tenerme paciencia a pesar de cualquier contratiempo o error que surgiese en mi vida. A mi querida hermana Carito que siempre me tiene presente en su mente con todo el esfuerzo que hace en el día a día trabajando y logrando sus sueños en la música. Agradecer a la Kathy y al Feña por darme la cuota de apoyo que siempre se necesita y a mi Maru, mi corazonada más bonita. Gracias a Dios (y a los demás por si hay más).

Índice de figuras

Figura 1.1: Ubicación de la antroposfera de Santiago.....	13
Figura 1.2: Ubicación hoya hidrográfica Tarapacá-Santa Rosa y entrada al Parque Comunitario Panul.	16
Figura 2.1: Expansión de la Antropósfera, evolución del porcentaje de urbanización posible de acuerdo con la normativa urbana y crecimiento total en las comunas de Santiago	23
Figura 2.2: Evolución de la Antropósfera de Santiago desde 1985 hasta 2022.	24
Figura 2.3: Tipos de movimiento y características de las diferentes remociones en masa. .	27
Figura 2.4: Esquema de relaciones entre los factores condicionantes.....	35
Figura 2.5: Morfología esquemática lateral, de planta y frontal de un flujo	39
Figura 2.6: Tipos de depósitos generados por flujos.....	40
Figura 3.1: Esquema general de la metodología para el análisis y reformulación del factor antrópico dentro de metodologías para la evaluación de susceptibilidad de flujos.....	51
Figura 3.2: Esquema general de la separación geomorfológica utilizada en este estudio....	64
Figura 3.3: Matriz de análisis de trazas antrópicas propuestas por AWG (2022) para el avance de la definición del Antropoceno.	65
Figura 3.4: Campos de validación de un mapa de susceptibilidad de flujos de detritos a partir de un catastro de activación.....	74
Figura 4.1: Geomorfológicas estructurales de Chile Central.	76
Figura 4.2: Figuras depositacionales y estructurales del sector oriente de Santiago.....	77
Figura 4.3: Mapa geológico de Santiago.....	80
Figura 4.4: Mapa geomorfológico del sector oriente de comuna de La Florida y hoyas hidrográficas respectivas.	81
Figura 4.5: Cabecera del Sistema Tarapacá – Santa Rosa y valle fluvial principal.	83
Figura 4.6: Mapa de pendientes del sector oriente de comuna de La Florida.	84
Figura 4.7: Geomorfológicas de desembocadura del Sistema Tarapacá – Santa Rosa.....	85
Figura 4.8: Mapa de orientación de laderas del sector oriente de comuna de La Florida. ...	87
Figura 4.9: Mapa geológico del sector oriente de comuna de La Florida.	88
Figura 4.10: Columna estratificada y desarrollo de suelo correspondientes a las rocas exhumadas de Formación Abanico.....	91
Figura 4.11: Depósito de remoción en masa antiguo aterrazado, Quebrada San Ramón.....	92
Figura 4.12: Depósito aluviales Pleistoceno Medio – Superior.	93
Figura 4.13: Sección de cuerpo del Depósito aluvional Holoceno y geología local.	93
Figura 4.14: Columna del abanico aluvial Holoceno del Sistema Tarapacá – Santa Rosa. .	95
Figura 4.15: Depósito aluvional Cuaternario y nueva red erosiva.	96
Figura 4.16: Depósito aluvial reciente y esporádico.	97

Figura 4.17: Unidades coluviales actuales	98
Figura 4.18: Suelo residual de la Formación Abanico.	99
Figura 4.19: Suelo residual de proveniencia aluvial en ladera de baja y alta exposición. .	100
Figura 4.20: Traza mayor de la falla de San Ramón y escalón del piedemonte.....	101
Figura 4.21: Mapa inventario de trazas antrópicas sector oriental de La Florida.	105
Figura 4.22: Evolución y dirección de avance de la Antropósfera del área.	106
Figura 4.23: Contención aluvial oriental en cuchilla norte de la zona aluvial baja.....	108
Figura 4.24: Contención aluvial occidental en cuchilla norte de la zona aluvial baja.	109
Figura 5.1: Unidades geomorfológicas definidas por Celis (2018) en la Quebrada.....	111
Figura 5.2: Unidades geomorfológicas preliminares definidas por este trabajo en Quebrada Tarapacá – Santa Rosa.....	112
Figura 5.3: Unidades geomorfológicas finales para Quebrada Tarapacá – Santa Rosa.	113
Figura 5.4: Dominios geomorfológicos para Quebrada Tarapacá – Santa Rosa.....	114
Figura 5.5: Mapa de susceptibilidad de flujos en base al IS propuesto por Lara (2007) ...	115
Figura 5.6: Mapa de susceptibilidad de flujos en base al IS de la formulación A.	121
Figura 5.7: Mapa de susceptibilidad de flujos en base al IS de la formulación B.....	125
Figura 5.8: Mapa de susceptibilidad de flujos en base al IS de la formulación C.....	128
Figura 5.9: Variograma de índices de susceptibilidad respectivos para cada formulación.	134
Figura 6.1: Descripción cualitativa y cuantitativa de susceptibilidad para unidades geomorfológicas pertenecientes al macrodominio geomorfológico de desembocadura.	139
Figura 6.2: Descripción cualitativa y cuantitativa de susceptibilidad para unidades geomorfológicas pertenecientes al macrodominio geomorfológico central.....	141
Figura 6.3: Descripción cualitativa y cuantitativa de susceptibilidad para unidades geomorfológicas pertenecientes al macrodominio geomorfológico de cabecera.....	143
Figura 6.4: Impactos antrópicos que afectan al factor de humedad en la desembocadura de Quebrada Tarapacá – Santa Rosa.	145
Figura 6.5: Mapa de susceptibilidad de flujos e inventario de trazas antrópicas para Quebrada Tarapacá – Santa Rosa.....	147
Figura 6.6: Mapa de condición geotécnica e inventario de trazas antrópicas para Quebrada Tarapacá – Santa Rosa.	149
Figura 6.7: Mapa de desestabilización artificial e inventario de trazas antrópicas	151
Figura 6.8: Mapa de condición de saturación e inventario de trazas antrópicas.	152
Figura 6.9: Histograma por rangos de frecuencia respecto al cálculo de IS obtenidos desde la formulación columnar.....	155
Figura 6.10: Histograma por rangos de frecuencia respecto al cálculo de IS obtenidos desde la formulación A.....	156

Figura 6.11: Histograma por rangos de frecuencia respecto al cálculo de IS obtenido desde la formulación B.	157
Figura 6.12: Histograma por rangos de frecuencia respecto al cálculo de IS obtenido desde la formulación C.	157
Figura 6.13: Diagramas de cajas y bigotes (boxplot) respecto a la dispersión y concentración de la base de datos de IS.	158
Figura 6.14: Gráfico de correlación del cálculo de IS respecto a la formulación columnar y la propuesta A.	163
Figura 6.15: Gráfico de correlación del cálculo de IS respecto a la formulación columnar y la propuesta B.	164
Figura 6.16: Gráfico de correlación del cálculo de IS respecto a la formulación columnar y la propuesta C.	165
Figura 7.1: Mapa de alcance de flujos e inventario de trazas antrópicas menores.	173
Figura 7.2: Mapa de alcance de flujos e inventario de trazas antrópicas mayores.	174

Índice de tablas

Tabla 2.1: Clases de velocidades de remociones (Cruden y Varnes, 1996).	25
Tabla 2.2: Clasificación de remociones en masa (Varnes, 1978).	25
Tabla 2.3: Sistema de clasificación propuesto por Hungr et al (2014).	26
Tabla 2.4: Factores condicionantes para cada tipo de remoción en masa (Hauser, 1993). ..	30
Tabla 2.5: Ponderación de factores condicionantes propuesta por Sepúlveda (1998).	31
Tabla 2.6: Ponderación de factores condicionantes por Lara y Sepúlveda (2010).	31
Tabla 2.7: Clasificación de flujos (Hungr et al., 2001).	37
Tabla 2.8: Recopilación de los efectos de producidos (directa e indirectamente) por el agente humano sobre los factores.	42
condicionantes para flujos de detritos (Sepúlveda, 1998; Lara, 2007) asociados a la caracterización geomorfológica de laderas y su inestabilidad.	42
Tabla 2.9: Recopilación de los efectos producidos (directa e indirectamente) por el agente humano sobre los factores.	43
condicionantes a flujos de detritos (Sepúlveda, 1998; Lara, 2007) asociados a la caracterización geológica y geotécnica de laderas y su inestabilidad.	43
Tabla 2.10: Recopilación de los efectos producidos (directa e indirectamente) por el agente humano sobre los factores condicionantes a flujos de detritos (Sepúlveda, 1998; Lara, 2007) asociados a la caracterización de flujos en laderas y su inestabilidad.	44
Tabla 2.11: Puntaje de factores condicionantes de flujo de detritos para cálculo de IS. Modificado de Lara (2007) y Lara y Sepúlveda (2010).	49
Tabla 2.12: Puntaje de factores condicionantes de flujo de detritos para cálculo de IS (continuación). Modificado de Lara (2007) y Lara y Sepúlveda (2010).	50

Tabla 3.1: Modificación de fases a la metodología columnar para evaluación de susceptibilidad de flujos.	52
Tabla 3.2: Estudios preliminares para la evaluación de peligro de remociones en masa. Modificado de Lara (2007).	56
Tabla 3.3: Reformulación conceptual de los factores gatillantes a flujos de la metodología de Lara (2007) respecto al factor antrópico.	58
Tabla 3.4: Propuestas de reponderación de los factores gatillantes a flujos de la metodología de Lara (2007).	60
Tabla 3.5: Justificación desglosada de reponderación específica de los factores gatillantes a flujos de la metodología de Lara (2007).	61
Tabla 3.6: Justificación desglosada de reponderación específica de los factores gatillantes a flujos de la metodología de Lara (2007) (continuación).	62
Tabla 3.7: Descripción de combinaciones de factores de condicionalidad integrados al factor de humedad de ladera.	68
Tabla 5.1: Unidades geomorfológicas con índice de susceptibilidad alto y muy alto en base al cálculo de Lara (2007).	116
Tabla 5.2: Niveles de susceptibilidad de flujos por superficie de área (en km ²), según el cálculo de Lara (2007).	116
Tabla 5.3: Interpolación de características, cálculo de contenido de humedad y resultados de granulometría.	120
Tabla 5.4: Unidades geomorfológicas con índice de susceptibilidad alto y muy alto en base al cálculo A.	122
Tabla 5.5: Niveles de susceptibilidad de flujos por área (en km ²), según el cálculo A.	122
Tabla 5.6: Unidades geomorfológicas con índice de susceptibilidad alto y muy alto en base al cálculo B.	125
Tabla 5.7: Niveles de susceptibilidad de flujos por área (en km ²), según el cálculo B.	126
Tabla 5.8: Unidades geomorfológicas con índice de susceptibilidad alto y muy alto en base al cálculo C.	129
Tabla 5.9: Niveles de susceptibilidad de flujos por área (en km ²), según el cálculo C.	129
Tabla 5.10: Estadística de frecuencia acumulada respecto al índice de susceptibilidad en la formulación columnar y porcentaje de validación relativo (Muñoz, 2018) al total de unidades geomorfológicas.	135
Tabla 5.11: Estadística de frecuencia acumulada respecto al índice de susceptibilidad en las formulaciones A, B Y C y porcentaje de validación relativo (Muñoz, 2018) al total de unidades geomorfológicas.	136
Tabla 5.12: Estadística y exploración descriptiva básica de la base de datos respectiva al cálculo de IS en este estudio.	132
Tabla 6.1: Coeficiente de correlación respecto a las propuestas de reponderación.	160

Tabla de contenido

1	Introducción	13
1.1	Formulación del estudio	13
1.2	Ubicación y vías de acceso	16
1.3	Objetivos	17
1.3.1	Objetivo general	17
1.3.2	Objetivos específicos	17
1.4	Metodología	18
1.4.1	Primera fase global	18
1.4.2	Segunda fase global	19
2	Marco Teórico	20
2.1	El agente humano como factor condicionante y Evento del Antropoceno	20
2.1.1	El Evento Antropoceno dentro de la Región Metropolitana	22
2.2	Remociones en Masa	24
2.2.1	Clasificación de remociones en masa	25
2.2.2	Factores desencadenantes	28
2.2.3	Factores condicionantes	30
2.3	Flujos	36
2.3.1	Clasificación de flujos	37
2.3.2	Propiedades de los flujos de detritos	38
2.3.3	Morfología	38
2.3.4	Modelos hidráulicos para flujos	40
2.3.5	Efecto del agente humano en factores que condicionan la susceptibilidad de flujos	

2.4	Antecedentes para la evaluación de peligro de flujo de detritos	45
2.4.1	Enfoques metodológicos para la evaluación peligros y riesgos geológicos.....	46
2.4.2	Antecedentes teóricos para la evaluación de susceptibilidad a flujos de detritos ...	47
3	Formulación teórica de la metodología para la evaluación de susceptibilidad de flujos de detritos con enfoque antrópico	51
3.1	Esquema general.....	51
3.2	Estudios preliminares de gabinete (G1)	54
3.3	Segunda fase de gabinete (G2)	57
3.3.1	Reformulación conceptual de la metodología preliminar.....	57
3.3.2	Reponderación de factores condicionantes en flujos definidas en la metodología .	59
3.4	Primera etapa de terreno (T1).....	63
3.4.1	Mapeo Geológico Básico.....	63
3.4.2	Mapeo geomorfológico.....	63
3.4.3	Caracterización de trazas antrópicas preliminares.....	64
3.5	Tercera fase de gabinete (G3).....	65
3.5.1	Definición de unidades geomorfológicas preliminares	66
3.6	Segunda etapa de terreno (T2).....	66
3.6.1	Definición final de unidades geomorfológicas de la cuenca	66
3.6.2	Caracterización geotécnica de detalle.....	67
3.6.3	Caracterización hidrológica e hidrogeológica	67
3.6.4	Caracterización de vegetación	69
3.6.5	Caracterización final e individual de actividad antrópica	69
3.6.6	Muestreo de material	70
3.6.7	Ensayos de humedad y granulometría simplificados	70
3.7	Cuarta fase de gabinete (G4)	71

3.7.1	Evaluación de susceptibilidad de flujos.....	71
3.7.2	Descripción estadística	72
3.8	Quinta fase de gabinete (G5).....	73
3.8.1	Validación de mapas de susceptibilidad.....	73
3.9	Sexta fase de gabinete (G6).....	74
3.9.1	Análisis visual de unidades geomorfológicas críticas (IS>50) e impacto humano real	74
3.9.2	Análisis estadístico y visual respecto a diferencias en los cálculos de IS propuestos	75
4	Antecedentes del área de estudio	76
4.1	Marco Geomorfológico	76
4.1.1	Geomorfología regional.....	76
4.2	Marco Geológico	79
4.2.1	Geología regional	79
4.3	Descripción local del área de estudio	81
4.3.1	Geomorfología.....	81
4.3.2	Geología	87
4.3.3	Estructuras locales	100
4.3.4	Vegetación	102
4.3.5	Clima, Hidrología e Hidrogeología	103
4.3.6	Sismicidad	104
4.3.7	Antecedentes de remociones en masa	104
4.3.8	Intervención antrópica	105
5	Evaluación de susceptibilidad de remociones en masa	110
5.1	Definición de unidades geomorfológicas preliminares	110

5.2	Definición de unidades geomorfológicas finales.....	113
5.3	Cálculo de índices de susceptibilidad de flujos	115
5.3.1	Calculo según Lara (2007)	115
5.3.2	Cálculos reponderados según este trabajo	121
5.4	Composición estadística de Mapas.....	131
5.5	Validación de fórmulas y selección final	135
5.5.1	Metodología de Lara (2007).....	135
5.5.2	Metodología con enfoque antrópico (Este trabajo)	136
6	Discusión	137
6.1	Correlación y efecto real del factor antrópico en el factor geológico/geotécnico de Quebrada Tarapacá – Santa Rosa.....	137
6.2	Correlación real del factor antrópico en el factor de humedad de Quebrada Tarapacá – Santa Rosa.....	144
6.3	Correlación visual de trazas antrópicas y caracterización de laderas	146
6.4	Correlación estadística y validación final de las propuestas para reformulación de factores.....	153
6.4.1	Estadística básica.....	154
7	Conclusión.....	166
7.1	Inferencias finales.....	166
7.2	Comentarios de las metodologías de evaluación de susceptibilidad de remociones en masa y recomendaciones a futuro	171
8	Bibliografía	176

1 Introducción

1.1 Formulación del estudio

La Región Metropolitana ha experimentado una rápida expansión del perímetro urbano ubicado dentro de la delimitación regional (Figura 1.1), generando así modificaciones al terreno que avanzan en sentido hacia el Piedemonte de la Cordillera de los Andes perteneciente a la provincia de Santiago, una de las zonas más con mayor tasa de ocupación urbana respecto al tiempo y que a su vez, presenta condiciones favorables para la génesis de eventos de remoción en masa.

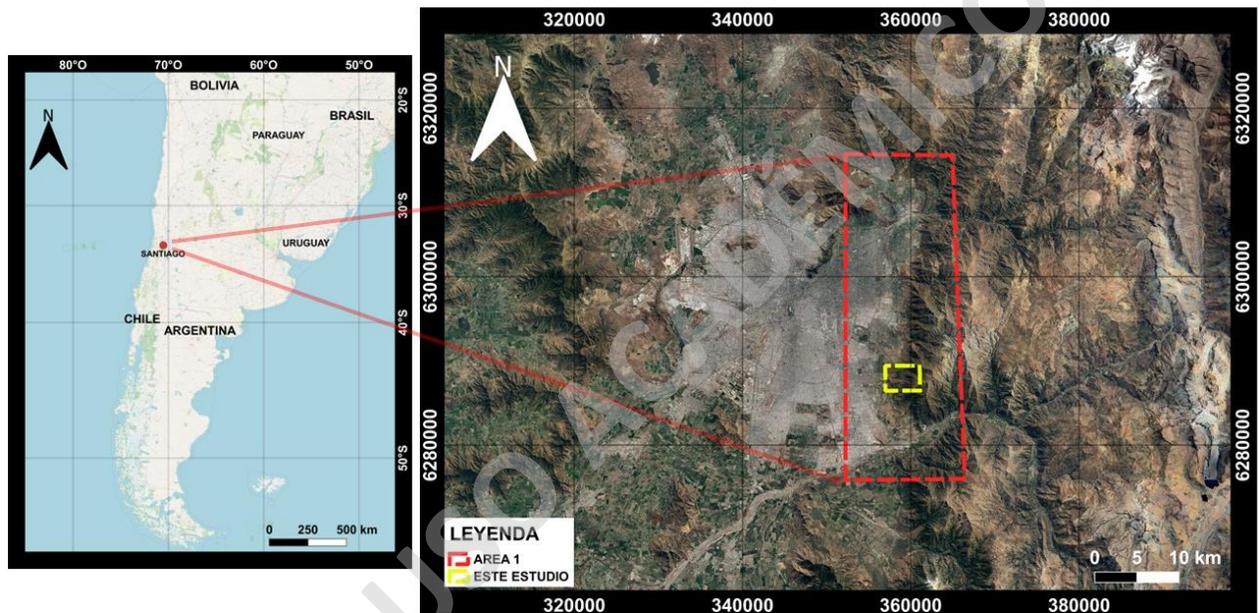


Figura 1.1: Ubicación de la antroposfera de Santiago. En rojo se presenta el prospecto de estudio correspondiente al frente cordillerano de la Región Metropolitana y en amarillo, el área local de estudio.

Los principales eventos geológicos que han sido identificados en el sector precordillerano de Santiago Oriente corresponden a deslizamientos de suelo y flujos de detritos, en conjunto a caídas y deslizamientos de roca sectorizados en diferentes porciones de las cuencas hidrográficas. La ocurrencia de estos fenómenos provoca la depositación de sedimentos no consolidados que actúan como material con características geotécnicas favorables para su fluidización y transporte ante eventos de precipitaciones. Los eventos más destructivos de remociones identificados en la zona corresponden a los flujos de detritos, donde el área de depositación de los sedimentos ha sido caracterizada con índices altos de peligro geológico en el sector urbano (Lara et al., 2018), tanto por las capacidades de liberación energética que puede tener una remoción de estilo acuoso en la

zona (Celis, 2018) como también por la cercanía que existe del perímetro oriental de la antroposfera respecto a las principales desembocaduras de las quebradas pertenecientes al Frente Cordillerano. La condición favorable para la génesis de estos fenómenos dentro del sector precordillerano proviene de 2 factores desencadenantes principales. Los flujos de detritos son desencadenados por periodos de lluvias intensas, con volúmenes de agua (abundantes o moderados) acumulados en periodos de tiempo cortos o extensos. Algunos fenómenos climáticos asociados con intensidades de precipitaciones anómalas respecto al tiempo atmosférico, como el calentamiento global, actúan como un factor a considerar ya que existe una correlación positiva de la aparición de nuevas remociones en masa respecto a estos nuevos periodos climáticos (Sepúlveda et al., 2006a, Moreiras et al., 2021). El pronóstico actual de desertización de la zona centro del país (Malmros et al., 2018; Cordero et al., 2019), la disminución de las precipitaciones, aumento en la probabilidad de lluvias intensas y aumento en la altura de la línea de nieves (Garreaud, 2011; Saavedra et al., 2018) aumentarían las probabilidades de riesgo geológico asociado a flujos en el sector Precordillerano. El segundo factor gatillante es la sismicidad, la cual aporta al transporte y depositación de roca en forma de caída o deslizamientos. La localidad registra sismicidad activa con foco en la falla San Ramón (Sistema de falla Pocuro), con longitud de falla de 30 km, profundidad desde unos 10-12 km y con un último episodio sísmico (MW 7,5) ocurrido hace unos 8.000 años (Vargas et al., 2018). Las características volumétricas de los eventos de lluvia en las cuencas de Chile Central, en conjunto a una periodicidad mensual/anual de sismicidad hace que sea altamente probable que se desencadenen eventos de flujos en el área, sin embargo, también existen factores condicionantes que supeditan esta susceptibilidad de remociones dentro del sector y que deben ser analizados e incorporados al estudio de remociones en masa, basándose en la actualidad climática y urbana. Los factores condicionantes de remociones en masa son: la geomorfología (rasgos como: la altura; extensión de ladera; pendiente de las laderas y la topografía); geología y geotecnia (tipo de material involucrado y las estructuras presentes); clima y vegetación (factores como lluvia y humedad del área); hidrología e hidrogeología y finalmente intervenciones antrópicas. Dentro de la literatura se ha definido que existen nuevos factores que condicionan a estos eventos y a su vez, existe evidencia de que la perturbación humana condiciona a estos rasgos (Rainato et al., 2018; Marchi et al., 2019). Los estudios geológicos para la obtención de datos respecto a los factores anteriormente mencionados han sido cuantificados y expuestos visualmente por softwares con diferentes sistemas de georreferencia integrados (Brabb et al., 1972; Newman et al., 1978). El enfoque actual de las

metodologías de susceptibilidad a remociones que incorporan software y mapeo de ladera se basan del estudio determinístico y modelamiento probabilístico combinado (Cuantitativo y cualitativo) de los fenómenos, utilizando principalmente métodos heurísticos de jerarquización de laderas para la evaluación de la susceptibilidad de remociones (Sepúlveda, 1998; Lara, 2007; Martínez, 2009; Lara y Sepúlveda, 2010; Ferrando, 2014); donde el factor geomorfológico y geotécnico se presentan como los factores condicionantes predominantes. El número de este tipo de estudios ha ido en alza, en línea a la creación de softwares más avanzados y a la necesidad de mitigar el peligro y riesgo geológico del país, pero la creciente expansión de la antroposfera y el impacto estratigráfico del sector hacen imperativo cuantificar y caracterizar las diferencias que produce el factor antrópico en los aspectos condicionantes predominantes de los deslizamientos y flujos mediante la caracterización de laderas, enfocada en la bioturbación humana.

La probabilidad de desestabilización de laderas en el sector suroriente de la Región Metropolitana está creciendo respecto al tiempo de acción del factor antrópico sobre los factores condicionantes predominantes y por consecuencia, los mapas de susceptibilidad de flujos de detritos generados a partir de las principales metodologías de jerarquización presentan un grado de subestimación del riesgo geológico de flujo de detritos, donde el factor antrópico pierde peso por desactualización.

El objetivo general de este trabajo es desarrollar una metodología para la evaluación de susceptibilidad de flujos de detritos en sectores piemontinos basada en estudios que califiquen y cuantifiquen el impacto antrópico y su alteración sobre factores geológicos que condicionan a este tipo de eventos de forma local, para así reevaluar la susceptibilidad de flujos en la hoya hidrográfica Quebrada Tarapacá - Santa Rosa (sector suroriente de Santiago) mediante una propuesta actualizada respecto a la formulación conceptual y ponderación de la jerarquización numérica de factores incluida en el cálculo de la susceptibilidad desarrollada por Lara (2007). Para ello se evalúa la susceptibilidad de flujos de detritos con la metodología propuesta por Lara (2007) anexando un análisis de la jerarquización y el contraste de factores condicionantes dentro de las laderas de la hoya Quebrada Tarapacá-Santa Rosa, ubicada en comuna de La Florida, Santiago Oriente. Para la creación de los productos geocientíficos de este estudio se utilizan los softwares SIG QGIS 3.26 y Google Earth Pro 7.3.4, en conjunto a Adobe Photoshop para la edición y Excel para la estadística. Esta evaluación está enfocada en la implicancia del factor antrópico, por lo cual las unidades geomorfológicas originalmente publicadas de la cuenca (Celis, 2018; Lara et al, 2018) serán redefinidas debido a las significativas diferencias de escala entre las hoyas hidrográficas de estudio.

1.2 Ubicación y vías de acceso

El área de estudio (Figura 1.2) se encuentra ubicada en la porción suroriental del sector precordillerano asociado a la Provincia de Santiago, localmente ubicado dentro de la comuna de La Florida. El área incluye la cuenca hidrográfica Quebrada Tarapacá-Santa Rosa, delimitada por la hoya Quebrada Lo Cañas hacia el Norte y Quebrada de la Morfilana hacia el Sur, entre las coordenadas 357.000 – 361.000 E y 6.287.100 – 6.288.600 N (Sistema WGS 84 / UTM zona 19S).

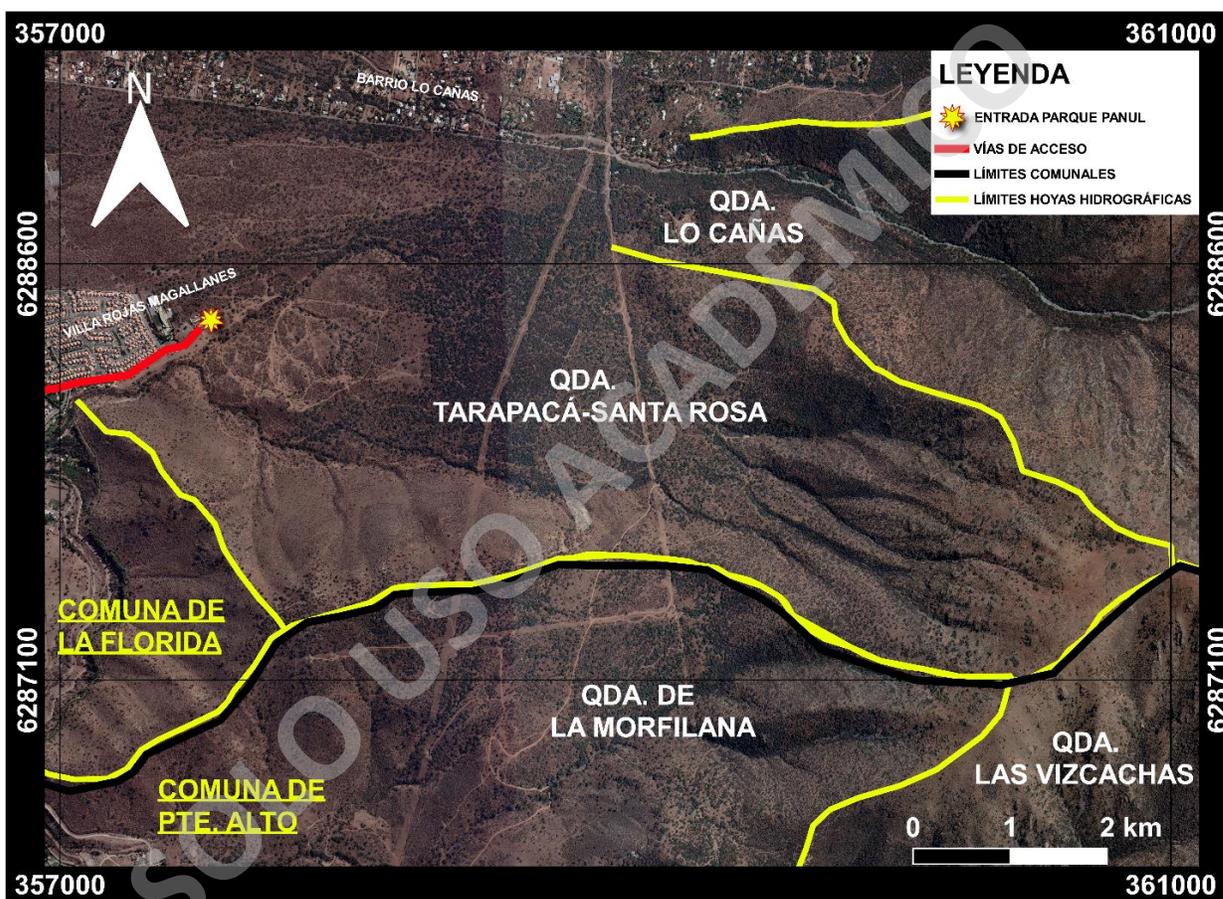


Figura 1.2: Ubicación hoya hidrográfica Tarapacá-Santa Rosa con su respectiva vía de acceso y localización de la entrada al Parque Comunitario Panul. En amarillo, límites de altas cumbres en las hoyas hidrográficas de las diferentes quebradas del sector y en negro, los límites comunales del sector suroriental de Santiago.

La vía de acceso principal a la quebrada en estudio corresponde a la Avenida Rojas Magallanes, la cual recorre latitudinalmente el sector urbano de La Florida, ubicado sobre el piedemonte y que da llegada a las puertas del Parque Comunitario Panul. El complejo inmobiliario “Jardines de la Viña” y el área del histórico Barrio Lo Cañas están contruidos contiguos al cauce y desembocadura de la hoya, marcando el límite de la antroposfera respecto al inicio del piedemonte en la precordillera.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es desarrollar una metodología para la evaluación de susceptibilidad de flujos de detritos en sectores piemontinos basada en estudios que califiquen y cuantifiquen el impacto antrópico y su alteración sobre los factores geológicos que condicionan a este tipo de eventos de forma local, para así reevaluar la susceptibilidad de flujos en la hoya hidrográfica Quebrada Tarapacá - Santa Rosa (sector suroriente de Santiago) mediante una propuesta actualizada respecto a la formulación conceptual y ponderación de la jerarquización numérica de factores incluida en el cálculo de la susceptibilidad desarrollada por Lara (2007).

1.3.2 Objetivos específicos

- Identificar la dependencia de los factores condicionantes en Sepúlveda (1998) y Lara (2007) respecto a las modificaciones antrópicas dentro del piedemonte de la Región Metropolitana.
- Reformular y postular, en base a la dependencia de los factores predominantes, nuevas formas de cálculo de la susceptibilidad de flujos de detritos respecto al impacto antrópico
- Identificar los eventos de flujos de detritos declarados en la zona de estudio y realizar una caracterización geológica-geotécnica de suelos y rocas existentes.
- Identificar y caracterizar los factores condicionantes, tales como: geología y geotecnia; geomorfología; hidrología; actividades antrópicas; vegetación y clima, en conjunto al análisis estadístico de factores desencadenantes de remociones en masa en las laderas.
- Evaluar la susceptibilidad de flujo de detritos con la metodología de Lara (2007) y este trabajo en Quebrada Tarapacá - Santa Rosa y así realizar mapas temáticos de susceptibilidad de remociones en masa que permitan representar los datos y resultados obtenidos en terreno.
- Analizar las características geotécnicas y geomorfológicas de unidades de laderas críticas que presenten antroturbación respecto a unidades geomorfológicas sin impacto antrópico.
- Modificar la representación de los mapas temáticos mediante el análisis del factor humano y la combinación de capas dentro de los mapas.
- Analizar las diferencias visuales y estadísticas de los mapas temas temáticos y sus unidades.

1.4 Metodología

Para actualizar la ponderación del factor antrópico respecto a la dependencia y alteración de factores condicionantes de flujos definidos en la literatura son aplicadas 8 fases de estudio, las cuales se presentan detalladamente en el tercer capítulo de este trabajo. Estas fases se encuentran alineadas respecto a 2 métodos principales para el estudio de susceptibilidad de flujo de detritos.

Las 6 primeras fases de este trabajo (fase G1; G2; T1; G3; T2 y G4) corresponden a la aplicación de algunas tareas iniciales en la metodología propuesta por Lara (2007). Dentro de esta metodología existen 9 etapas de trabajo diferentes, las cuales se encuentran a una escala de cuenca hidrográfica. En el punto 1.4.1 se describe de forma general la primera parte de la metodología de este estudio, donde se incluye y se obvian algunas etapas propuestas por Lara (2007), pero también se añaden nuevas tareas, las cuales están presentes en todas las fases. La segunda parte de la metodología de este estudio (fase G5 y G6) consta del desarrollo de mapas de representación de índice de susceptibilidad (IS) generados con las diferentes formulaciones desarrolladas, los cuales avanzan a un proceso de validación de calidad de datos. La metodología concluye con una definición y descripción de unidades naturales y críticas las cuales pasan finalmente a la etapa de discusión. Se aplican ensayos básicos de humedad y granulometría en laderas críticas y naturales definidas y se procede a realizar un análisis estadístico y visual de la reformulación propuesta dentro de la metodología por Lara (2007), para así posteriormente concluir el impacto del factor antrópico en los demás factores condicionantes con evidencia aritmética y visual. En el punto 1.4.2. se describe la segunda parte de la metodología de este estudio.

1.4.1 Primera fase global

La primera parte de la metodología de este estudio consta de la aplicación de algunas tareas creadas por Lara (2007) y otras propuestas por este trabajo. El primer gabinete conlleva la recopilación de antecedentes sobre la zona mediante la búsqueda de material geológico (cartas geológicas, fotografías aéreas, datos geotécnicos o imágenes ráster). Posteriormente la recopilación se centra en búsqueda de información respecto a la influencia antrópica en las características de los factores que condicionan a los flujos (presente en subtítulo 2.2.5 del capítulo 2 de flujos) (FASE G1).

La metodología complementaria que propone este estudio conlleva la utilización de la bibliografía recopilada en la etapa G1 y la opinión de académicos de la comunidad científica respecto a la modificación metodológica, donde se genera así una propuesta actualizada de formulación y

ponderación respecto de la metodología de Lara (2007), que integra los estudios de dependencia de factores condicionantes de flujos respecto al agente antrópico obtenidas en la literatura. En esta fase se sugieren 3 fórmulas de ponderación, siendo el objeto de análisis en la discusión (FASE G2).

Luego de la propuesta preliminar, se procede a la primera fase de terreno, la cual conlleva la realización del mapeo geológico y estructural básico en escala 1:14.000 (FASE T1). Esta fase es de suma importancia, ya que una de las obligaciones del trabajo de campo es identificar y geolocalizar unidades geomorfológicas con presencia de antropización que sea trazable.

La primera etapa de terreno da paso al gabinete de mapeo preliminar de unidades geomorfológicas que componen a la cuenca. Las delimitaciones de las unidades y el factor de escala final respecto a las trazas ubicadas en el área son corroboradas en la segunda tarea de terreno I (FASE G3).

Posteriormente, con los datos recopilados preliminarmente se definen las unidades geomorfológicas finales de la Quebrada Tarapacá-Santa Rosa respecto a diferencias geomorfológicas, geotécnicas y antrópicas (escala 1:14.000), se realiza además el muestreo de suelo de unidades geomorfológicas críticas y/o con trazas de antropización, sumado al mapeo estructural de detalle a escala de ladera (escala 1:14000) (FASE T2). Además, en esta etapa se llevan a cabo las descripciones de trazas antrópicas predominantes en la estratigrafía.

Finalmente se realiza el cálculo de susceptibilidad de flujos de detritos utilizando la metodología heurística-jerárquica de Lara (2007) y las diferentes propuestas de ponderación de IS (FASE G4).

1.4.2 Segunda fase global

La segunda fase conlleva la validación de la base de datos de IS y los mapas de susceptibilidad asociados tanto al cálculo en la metodología de Lara (2007) y como las propuestas aritméticas de este trabajo. Con esto se logra definir la propuesta más objetiva en base a los nuevos productos y visualizaciones de la susceptibilidad de flujos en la quebrada respecto al factor antrópico. Estos son validados mediante el método propuesto por Muñoz (2013), el cual fue revisado y aprobado por profesionales involucrados en metodologías de susceptibilidad de flujos nacional (FASE G5).

Los resultados concluyen con la sexta etapa de gabinete, la cual consta de la descripción de unidades geomorfológicas naturales y críticas en base al: resumen estadístico de IS; impacto antrópico; carácter geológico y geotécnico descrito en las laderas. Finalmente se realiza una aplicación de ensayos básicos de humedad y granulometría en ladera crítica y natural (FASE G6), dando paso a la fase de discusión de este estudio con el mayor número de evidencia antrópica.

2 Marco Teórico

2.1 El agente humano como factor condicionante y Evento del Antropoceno

La Tierra ha sido estudiada bajo el modelo del sistema Biosfera, el cual está dividido originalmente por 3 diferentes sistemas o “esferas” (Hutchinson, 1968; Whittaker y Likens, 1975). Estos sistemas interactúan entre sí continuamente a escala geológica y dan lugar a procesos naturales endógenos y exógenos, con transferencias de energía y masa entre cada una de estas (Kump et al., 2010). Sin embargo, el funcionamiento de los ciclos naturales y otros procesos propios de estos sistemas se han visto alterados y condicionados por la necesidad de comodidad y asentamiento del ser humano. Gracias al constante crecimiento y notoriedad de alteraciones a las características de estos eventos naturales tales como procesos atmosféricos (Ciclo del nitrógeno, lluvias ácidas, efecto invernadero, entre otros), hidrológicos (Contaminación de los océanos, acidificación del agua, ciclo del agua, entre otros) o litosféricos (Desestabilización de laderas, sedimentación y erosión, entre otros), se generó una ascendente preocupación por el estudio cuantificable de este impacto, en conjunto a la definición geológica formal y postulación del límite inicial del evento a escala geológica que sirviese como una única convención del concepto dentro de los estudios cronoestratigráficos. La época donde los efectos del impacto al funcionamiento o a las características de los sistemas naturales producto del agente humano, definido como antroperturbación o bioturbación humana (Haff, 2014), ya fueron cuantificables dentro de las épocas de la escala geológica fue llamado Evento del Antropoceno, con la finalidad de marcar un límite respecto a la serie actual del Holoceno.

El concepto “Antropoceno” es un término ampliamente utilizado desde su acuñación por Crutzen y Stoermer (2000) y que presenta muchos enfoques científicos diferentes (como, por ejemplo, la Sociología). En Geología, este concepto se asocia al impacto intensificado y significativo desde el inicio de la industrialización global modificando el estado típico del sistema Tierra asociado al Holoceno, y donde la predominancia del agente antrópico ha sido evidenciada en: un aumento del orden de magnitud en la erosión y el transporte de sedimentos asociados con la urbanización y la agricultura; perturbaciones antropogénicas marcadas en los ciclos de elementos como el carbono, nitrógeno, fósforo, diversos metales y junto con nuevos compuestos químicos; cambios ambientales generados por estas perturbaciones incluido el calentamiento global, el aumento del nivel del mar, la acidificación de los océanos y la propagación de las "zonas muertas" oceánicas; cambios rápidos en la biosfera, como resultado de la pérdida de hábitats, la depredación y explosión

de la población en animales domésticos y finalmente la presencia de material producido por el humano dentro de la estratigrafía producto de la proliferación y dispersión mundial de muchos nuevos “minerales” y “rocas”, incluyendo hormigón, material particulado y plásticos, en conjunto a procesos geológicos condicionados, como las caídas de roca, flujos de detritos, entre otros. Muchos de estos cambios están alterando la trayectoria del sistema Tierra de forma permanente, los cuales persistirán en el tiempo de milenios o más (Syvitski et al., 2020; Zalasiewicz et al., 2021) Actualmente la Comisión Internacional de Estratigrafía (ICS) ha dispuesto de un grupo de trabajo dentro de la Subcomisión de Estratigrafía Cuaternaria (SQS) llamado Grupo de Trabajo del Antropoceno (en inglés, Anthropocene Working Group o AWG) con la tarea de examinar al evento definido como Antropoceno y adicionar una posible Escala de Tiempo Geológico, consistente con la definición de Crutzen y Stoermer (2000). Gracias a los crecientes estudios del impacto de la raza humana realizados por AWG, el modelo de Biosfera ha sufrido modificaciones y ha sido ilustrado incluyendo otro sistema de la Tierra definido como Antropósfera, sin embargo, el Antropoceno aún no es una unidad geológica definida formalmente dentro de la Escala de Tiempo Geológico.

El sistema Antropósfera ha tenido un impacto significativo y cuantificable hacia los demás sistemas de la Tierra y este ha sido cimentado desde los inicios de la Edad Antigua con la formación de las principales civilizaciones que han utilizado los recursos naturales para la infraestructura de sus ciudades, sin embargo, la evolución tecnológica que dio paso a la 2da revolución industrial en conjunto con los análisis y descubrimientos científicos asociados a la agricultura ocurridos en la primera mitad del siglo XX provocaron un crecimiento exponencial de carácter demográfico y urbano, constituyéndose así las primeras grandes antroposferas del planeta las cuales no han cesado de crecer en la actualidad (Zalasiewicz y Waters, 2019)

Existen evidencias de antropización preservadas entre los estratos acumulados recientemente, los cuales trazan los inicios de explosión y crecimiento del sistema antrópico, donde los marcadores primarios más sincrónicos y evidentes están constituidos por radionucleidos artificiales propagados en todo el mundo por las pruebas de bombas termonucleares realizadas en la 2da guerra mundial, a principios de 1950 (Zalasiewicz y Waters, 2019; Williams et al., 2019). Países que presentan diferencias topográficas y geomorfológicas abruptas (como lo es el caso chileno y sudamericano occidental) evidencian el impacto estratigráfico generado por el humano dentro de geomorfologías climáticas y dinámicas, producto de la expansión de la antroposfera y la extracción de recursos principalmente. Producto de esta expansión, nace el concepto utilizado ampliamente en la región

Latinoamericana para definir geomorfologías de ladera ampliamente urbanizadas denominado “ladera urbana” (Caballero, 2011) para la conceptualización del conjunto de las características tanto geológicas como antrópicas dentro de las geomorfologías territoriales y sus interrelaciones.

2.1.1 El Evento Antropoceno dentro de la Región Metropolitana

Los procesos de urbanización de la Región Metropolitana han sido una característica de la escena nacional, donde la génesis de los marcadores antrópicos en el sector ha estado trazada desde hace más de 70 años (Vargas, 2018), con la presencia de: bioturbación humana asociada a faenas de oro y cobre; impacto estratigráfico por construcción de ferrocarriles, túneles y viviendas; modificación a geoformas climáticas depositacionales y erosivas con infraestructura antrópica; entre otros.

La urbanización se define como el proceso de concentración de la población en áreas urbanas y la transformación dicotómica en las conductas sociales, culturales y económicas de la vida cotidiana, donde la población va apoderándose de las áreas rurales sin mucha intervención antropogénica, tales como el área de vegetación, el área de agricultura y el área de suelo desnudo (Sobrino, 2012).

El proceso explosivo de ocupación de suelo fue la primera reacción a la multiplicación de la población nacional, a la sobresaturación de las áreas urbanas céntricas y al cambio de políticas en el país a inicios de 1979, donde el uso de suelo fue constitucionalmente ingresado al mercado de bienes, con la posterior creación de planes de desarrollo urbano en la capital.

Uno de los principios fundamentales para el mercado del recurso era la idea de que el suelo urbano no era un recurso escaso y que su exigüidad sólo era consecuencia de la falta de concordancia entre las normas técnicas vigentes (modelo estado céntrico), y la oferta y la demanda (modelo de inversión) por suelo en el mercado. Así se estableció entonces que las restricciones de uso de suelo por parte del Estado “inflaban artificialmente” el precio de este, lo que condujo a ampliar el área urbana (Bozzo et al., 2005) y por consecuencia, el perímetro de la antroposfera de Santiago.

El sector suroriente de la Región Metropolitana ha sido una de las localidades con mayores cambios de suelo a lo largo de los 2000. Estudios recopilatorios como el de Vargas et al. (2018) han cuantificado visualmente la expansión de la antroposfera con el paso de los años, y a su vez, han cuantificado estadísticamente el aumento de los porcentajes de urbanización sobre la Falla de San Ramón y en el número de población del sector oriente de Santiago (Figura 2.1). Estos estudios dieron paso a la generación de políticas, planos y programas de evaluación ambiental estratégica.

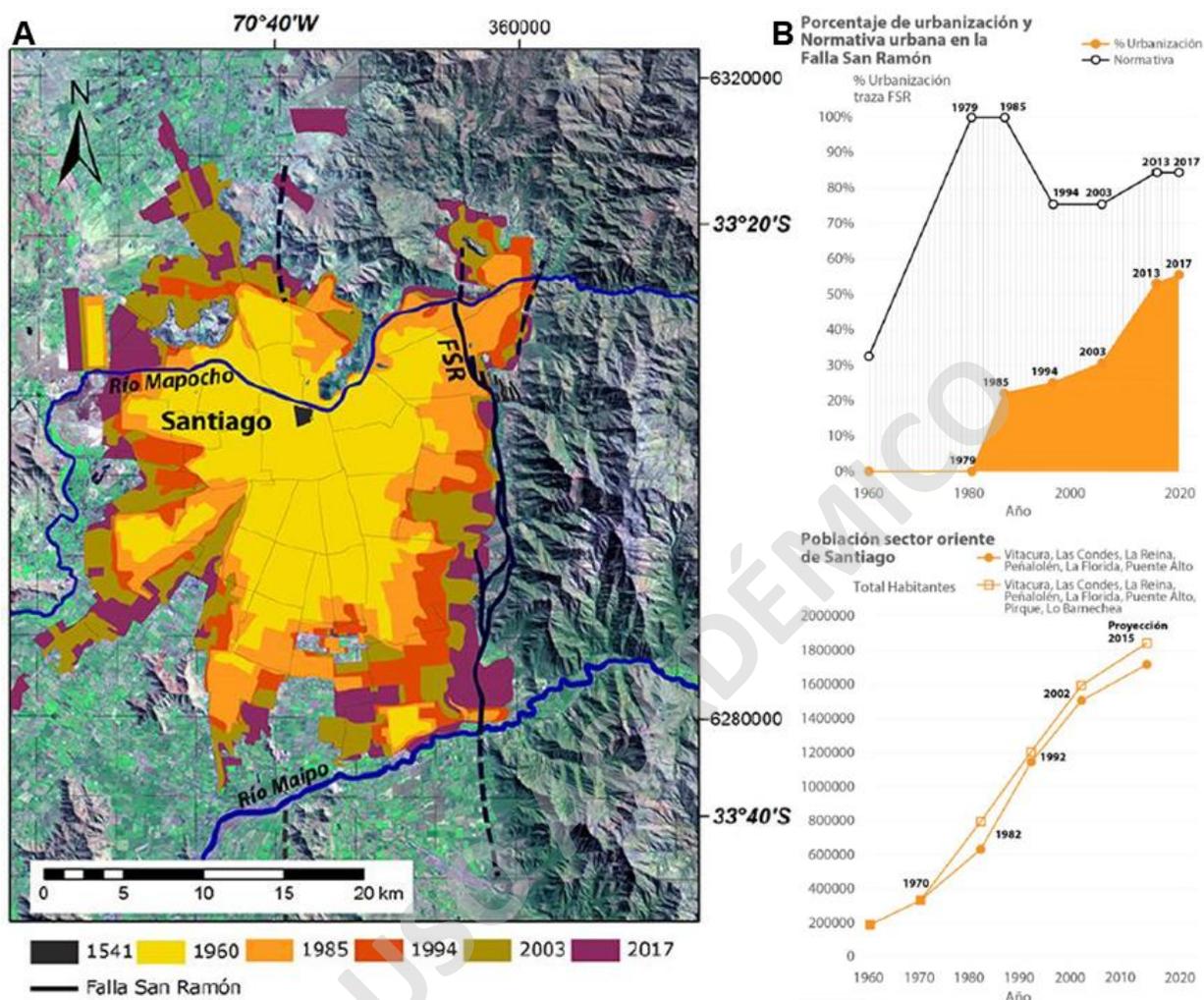


Figura 2.1: De izquierda a derecha: A: Expansión de la Antropósfera de Santiago a partir de la superposición de manchas urbanas y evolución del porcentaje de urbanización posible de acuerdo con la normativa urbana vigente. B: Crecimiento total en las comunas del sector oriente de Santiago (Vargas et al., 2018). Nótese la mancha urbana más actual, yacente al piedemonte de la Cordillera de los Andes y a la kilométrica Falla San Ramón.

A lo largo de los años, estos cambios trajeron consigo una ordenación de la población, edificaciones e industrias inmobiliarias, ocupación de suelos vegetados con confluencia fluvial, construcciones que modifican el medio ambiente y la topografía del relieve natural (Figura 2.2). Estas políticas fueron implementadas posterior al terremoto del 27 de febrero de 2010 donde finalmente, el Gobierno de Chile desde 2016 ha fortalecido la institucionalidad del Ministerio del Medio Ambiente, actualizando la caracterización y definición de los territorios (Mediante el Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas o SBAP) en conjunto a la realización de Programas de Recuperación Ambiental y Social (PRAS), los cuales velan por impulsar el desarrollo

ambientalmente sustentable, demostrando que es posible la convivencia respetuosa entre las actividades industriales, la calidad de vida de las personas y el cuidado del medioambiente.

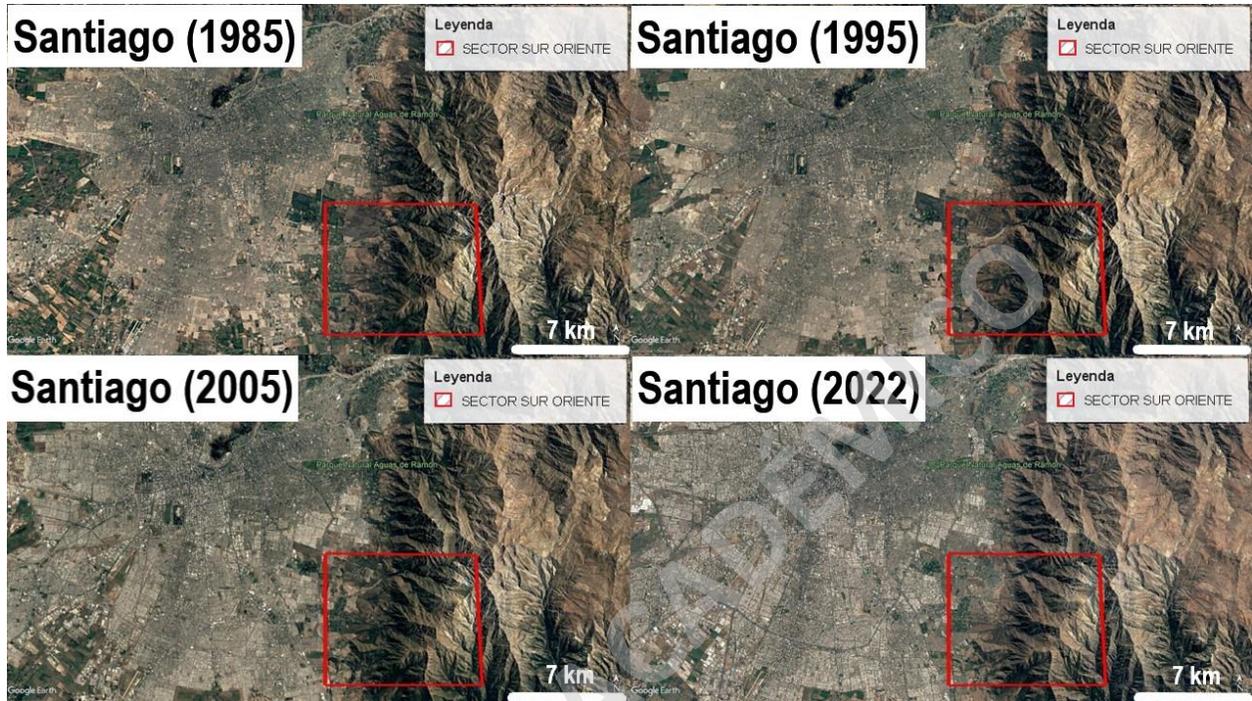


Figura 2.2: Evolución de la expansión de la Antropósfera de Santiago desde 1985 hasta 2022. En rojo, se presenta el sector suroriente como una de las zonas profundamente pobladas. Nótese la pérdida de suelo vegetado respecto al año capturado (sectores más verdesos). Figura generada mediante imágenes satelitales Landsat/Copernicus y Google Earth.

2.2 Remociones en Masa

Los eventos de remociones en masa corresponden a todos los procesos de movimientos ladera abajo, tanto de roca como de detritos o suelo, provocado por efectos de la gravedad (Cruden, 1991). La reformulación de Cruden y Varnes (1996) en conjunto a la actualización realizada por Hungr et al. (2014) de este concepto, definen finalmente a las remociones en masa como un proceso de transporte de material, de movilización lenta o rápida de un volumen de suelo y/o roca, generados por una serie de factores (especialmente gravitacionales) considerando que una porción específica del conjunto del terreno se desplaza hasta una cota o nivel inferior al original.

Los estudios de Cruden y Varnes (1996) presentan los valores de tasa de movimiento en términos cualitativos de rapidez, clasificando a las remociones por “clase de velocidad” (Tabla 2.1). Este parámetro se relaciona intrínsecamente con la intensidad y amenaza probable de un movimiento descrito previamente bajo el contexto geológico en el que se puede llegar a desarrollar.

Tabla 2.1: Clases de velocidades de remociones en masa (Cruden y Varnes, 1996)

Clase de velocidad	Descripción	Velocidad [mm/s]	Velocidad típica
7	Extremadamente rápida	$> 5 \times 10^3$	$> 5 \text{ m/s}$
6	Muy rápida	$5 \times 10^3 - 5 \times 10^4$	$5 \text{ m/s} - 3 \text{ m/min}$
5	Rápida	$5 \times 10^4 - 5 \times 10^1$	$3 \text{ m/min} - 1,8 \text{ m/hr}$
4	Moderada	$5 \times 10^1 - 5 \times 10^3$	$1,8 \text{ m/hr} - 13 \text{ m/mes}$
3	Lenta	$5 \times 10^3 - 5 \times 10^5$	$13 \text{ m/mes} - 1,6 \text{ m/año}$
2	Muy lenta	$5 \times 10^5 - 5 \times 10^7$	$1,6 \text{ m/año} - 16 \text{ mm/año}$
1	Extremadamente lenta	$< 5 \times 10^7$	$< 16 \text{ mm/año}$

Cada tipo de remoción en masa puede alcanzar distintas velocidades, tener o no límites definidos (Glade et al., 2005), presentar volúmenes de distintas magnitudes y evolucionar a otros tipos de remoción con diferentes alcances e índices de peligro geológico (Highland y Bobrowsky, 2008). Todas estas propiedades hacen que estos fenómenos sean violentos, rápidos e impredecibles.

2.2.1 Clasificación de remociones en masa

La clasificación de remociones en masa más aceptada corresponde a la propuesta por Varnes (1958, 1978), ya que esta utiliza criterios como el tipo de movimiento y el tipo de material transportado de forma breve, como se muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Clasificación de remociones en masa (Varnes, 1978)

Tipo de movimiento		Tipo de Material			
Caída		Roca	Suelo		
Volcamiento					
Deslizamiento	Rotacional		Grano grueso (Detritos, $< 80\%$ Partículas $< 2 \text{ mm}$)	Grano fino (Barro, $> 80\%$ Partículas $< 2 \text{ mm}$)	
	Traslacional				
Extensiones laterales					
Flujos					
Complejo					

Dentro del registro de estudios se han propuesto otros tipos de clasificación tales como la del trabajo de Hutchinson (1968, 1988), la actualización realizada por Cruden y Varnes (1996) a su anterior clasificación y la definición de tipos de remociones en masa propuesta por Hungr et al., (2001, 2014), modificando la clasificación más aceptada con la asignación de términos específicos a cada 32 fases de movimiento dentro de un marco taxonómico (Tabla 2.3).

Tabla 2.3: Sistema de clasificación actualizado propuesto por Hungry et al (2014).

Tipo de movimiento	Roca	Suelo
Caída	1. Caída de roca/hielo	2. Caída de bloques/detritos/limo
Volcamiento	3. Vuelco de bloques 4. Vuelco flexural de roca	5. Volcamiento de grava/arena/limo
Deslizamiento	6. Deslizamiento rotacional	7. Deslizamiento rotacional de arcilla / limo
	8. Deslizamiento planar	10. Deslizamiento planar de arcilla / limo
	9. Deslizamiento en cuña	11. Deslizamiento de grava/arena/detritos
	12. Deslizamiento compuesto 13. Deslizamiento irregular	14. Deslizamiento compuesto de arcilla/limo
Propagación lateral	15. Propagación de talud	16. Propagación por licuefacción de arena/limo
		17. Propagación por arcilla sensitivas
Flujo	18. Avalancha de rocas/hielo	19. Flujo seco de arena/limo/detritos
		20. Deslizamiento por flujo de arena/limo/detritos
		21. Deslizamiento por flujo de arcillas sensitivas
		22. Flujo de detritos
		23. Flujo de barro
		24. Crecida de detritos
		25. Avalancha de detritos
		26. Flujo de Tierra
27. Flujo de turba		
Deformaciones de talud	28. Deformación de montaña	29. Deformación de talud de suelo
	30. Deformación de talud de roca	31. Reptación de suelos 32. Solifluxión/gelifluxión

Clasificar una remoción en masa y asignarla respecto a un único movimiento es complejo producto de los diversos comportamientos tanto del movimiento como de las condiciones que la generan.

Las condiciones de una ladera y la probabilidad de falla asociada a factores que desencadenan las remociones pueden dar cierta evidencia para la determinación de un fenómeno específico, pero el constante cambio en las condiciones exógenas y endógenas del ambiente provoca que el proceso de falla de una ladera pueda generar una remoción en masa distinta según esta cambie sus características y se transforme en otro tipo de evento (Glade et al., 2005).

En la figura 2.3 se ilustran los principales movimientos y características de los diferentes tipos de remociones en masa, donde Celis (2018) modifica y agrupa de mejor manera las ilustraciones pertenecientes al libro de Highland y Bobrowsky (2008).

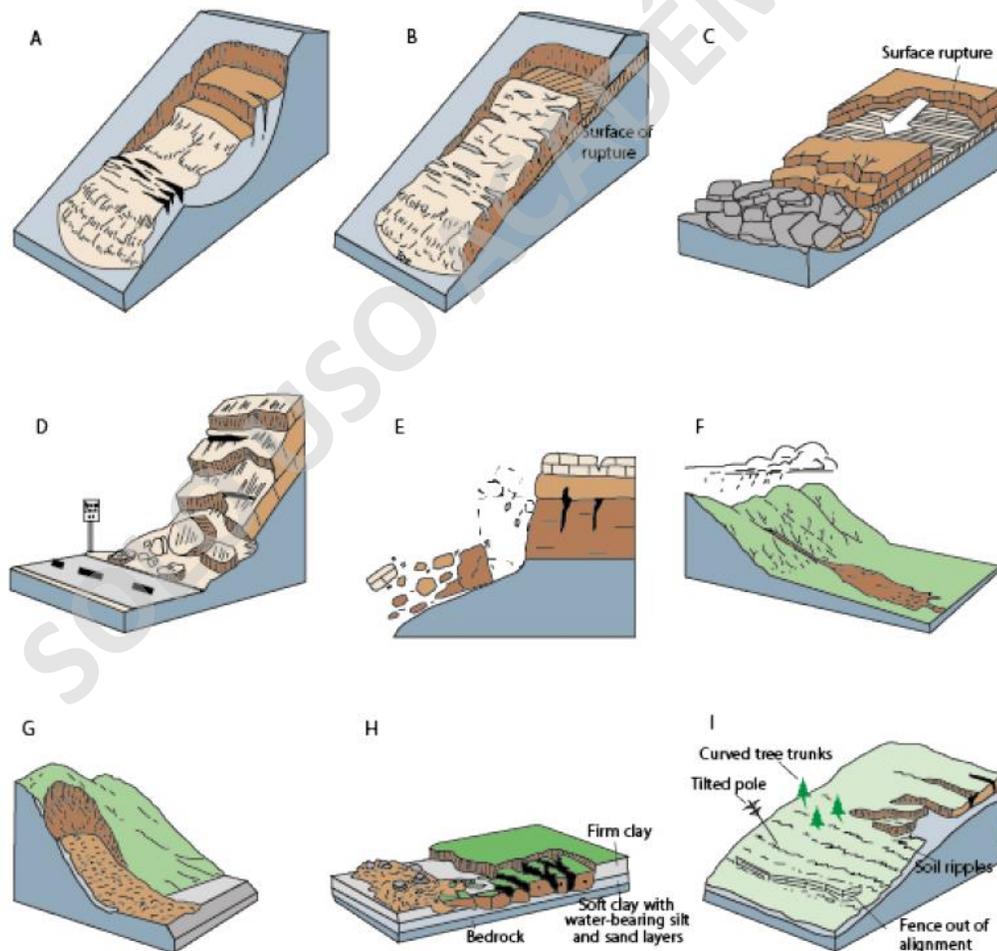


Figura 2.3: Tipos de movimiento y principales características de las diferentes remociones en masa. A. Deslizamiento rotacional; B. Deslizamiento traslacional de suelo; Deslizamiento traslacional de roca; D. Caídas o Desprendimientos de rocas; F. Volcanismo; F. Flujos de detritos; G. Avalancha de detritos; H. Propagación lateral; I. Reptación. Ilustración original de Highland y Bobrowsky (2008), modificada y extraída de Celis (2018).

2.2.2 Factores desencadenantes

Son aquellos factores que desatan cambios en la estabilidad del terreno mediante el traspaso de energía para iniciar el movimiento del material que puede hallarse en equilibrio y así dar génesis a los procesos de remociones en masa (González de Vallejo, 2002). Tanto eventos intensos de lluvia como los fenómenos sísmicos son los factores disparadores de remociones en masa más aceptados, pero estas también pueden ser desencadenadas por actividad antrópica, volcanismo, fusión de hielo o procesos de licuefacción (Muñoz, 2013). La humectación y vibración de los depósitos de roca o suelo trae consigo la disminución de la fricción entre partículas y por consecuencia, el movimiento ladera abajo del flujo (Costa, 1988 en González de Vallejo et al., 2002).

2.2.2.1 Precipitaciones

Este factor se relaciona fundamentalmente con el volumen, intensidad y distribución de las precipitaciones (González de Vallejo et al., 2002). Los eventos lluviosos de poca o alta intensidad en periodos largos de tiempo pueden modificar las condiciones de las laderas continuamente, generando fenómenos de remoción en masa de gran magnitud y profundidad, mientras que precipitaciones de gran intensidad en periodos cortos pueden desencadenar eventos más superficiales en zonas donde la susceptibilidad sea alta (Aleotti, 2004; Sepúlveda y Padilla, 2008). El agua infiltrada genera presiones que alteran los estados tensionales, provocado por presiones intersticiales y el aumento del peso, procesos de erosión interna y externa, y cambios mineralógicos, aspectos que modifican las propiedades y resistencia de los materiales. (Celis, 2018) En Chile central, varios estudios han determinado que existe una clara correlación entre la presencia del fenómeno El Niño, en donde existe una tendencia de precipitaciones y el desarrollo de tormentas desencadenadoras de eventos de remoción en masa (García, 2000; Padilla, 2006). Otro tipo de acciones relacionadas al clima son los procesos de deshielo, los que provocan inestabilidad superficial en laderas de suelos de zonas frías y desprendimientos en macizos rocosos (González de Vallejo et al., 2002).

Las tendencias climáticas actuales de los Andes Centrales y las proyecciones futuras muestran, además del aumento de la temperatura, una disminución de las precipitaciones de invierno, aumento de las precipitaciones de verano y un aumento en la naturaleza torrencial de las tormentas, clasificando al evento climático actual de la región como una mega sequía. (Fuenzalida et al., 2006; IPCC, 2014; Moreiras y Sepúlveda, 2013; Garreaud, 2017; Moreiras et al., 2021)

2.2.2.2 Sismos

Los eventos sísmicos otorgan el input de vibración y movimiento de todo tipo en las laderas, dependiendo de las características tanto del terreno como del fenómeno telúrico, es decir, características geotécnicas de los materiales y la magnitud en conjunto a la profundidad del epicentro de ruptura (Lara, 2007). Las aceleraciones y los diferentes movimientos que presentan las ondas sísmicas generan un cambio momentáneo en la reología de las rocas y depósitos, produciendo inestabilidad en estas. Durante eventos sísmicos se pueden generar desprendimientos de bloques, deslizamientos, flujos y avalanchas rocosas. En zonas con suelos saturados no cohesivos, la vibración puede causar remociones debido a la licuefacción del material. (Lara, 2007) Chile es un país altamente sísmico, por lo cual han sido publicados diferentes estudios nacionales con la finalidad de mitigar y prevenir el peligro de remociones en masa en el territorio. Sepúlveda et al. (2006a, 2006b) ha estudiado factores como la amplificación topográfica de ondas sísmicas como causante de generación de fallas de laderas en roca, mientras que otros estudios utilizan la caracterización numérica de la máxima aceleración sísmica horizontal (PGA o “peak ground acceleration”) por su relación con fuerzas inerciales sobre los cuerpos afectados (Lara, 2007).

Por otro lado, estudios internacionales como los de Keefer (1984) establecen relaciones entre la magnitud de un sismo y los tipos de remoción en masa que generan. Según la actualización de Rodríguez et al. (1999), se establecieron abundancias relativas de remociones en masa generadas por 40 eventos sísmicos diferentes, donde los flujos de detritos presentaron una abundancia moderada respecto a la ocurrencia de los terremotos, estableciendo límites de magnitudes mínimas.

2.2.2.3 Otros factores

En ambientes volcánicos, las erupciones pueden gatillar deslizamientos producto de la fusión de la nieve acumulada en las laderas de los volcanes (González de Vallejo et al., 2002). Este tipo de flujo es denominado “lahar”. Los flujos de detritos volcánicos o lahares, también se pueden producir por lluvias intensas sobre depósitos de tefra (Pierson, 1987; Coussot y Meunier, 1996). Otro ejemplo de remociones en ambientes volcánicos son las avalanchas por colapso del edificio volcánico.

La fluidización o licuefacción de un suelo saturado por el colapso de otra masa de suelo o rocas o como respuesta a vibraciones sísmicas o volcánicas, es otra manera de convertir al suelo en una masa viscosa que puede fluir en forma de flujo de detritos (Prieto, 1985; Selby, 1993; González de Vallejo et al., 2002).

2.2.3 Factores condicionantes

Se refieren a todas las características o condiciones físicas del terreno que favorecen la reducción de resistencia de una ladera y que supeditan tanto el movimiento de una remoción en masa como la susceptibilidad de génesis de esta (Hauser, 1993), los cuales son presentados en la tabla 2.4.

Tabla 2.4: Factores condicionantes relevantes para cada tipo de remoción en masa (Hauser, 1993)

Tipo de remoción en masa Factor Condicionante	Caída	Deslizamientos	Toppling	Flujos	Extensiones Laterales
Geología y Geotecnia	X	X	X	X	X
Geomorfología	X	X	X	X	X
Hidrología e Hidrogeología	X	X	X	X	X
Vegetación y Clima		X		X	X
Actividad Antrópica	X	X	X	X	

La susceptibilidad se define como la capacidad o potencialidad de una unidad geológica geomorfológica de ser afectada por un proceso geológico determinado (Glade et al., 2005). Bajo los estudios de remociones en masa, tanto deslizamientos como flujos están condicionados por 5 factores en general. Trabajos geológicos cercanos al área de estudio como el de Sepúlveda (1998), definen que los factores condicionantes predominantes y de mayor influencia en la potencialidad o susceptibilidad de génesis de remociones en masa corresponden al factor geológico-geotécnico y al factor geomorfológico de las laderas, en base tanto a la metodología utilizada por Ferrando (2000) como también a la opinión y discretización de diversos geólogos y geólogas.

En base a los avances cartográficos y geocientíficos se han generado diversas metodologías que incorporan un desarrollo de tablas numéricas que ponderan y jerarquizan los factores para el estudio estadístico de estos, como por ejemplo los valores originales de ponderación para remociones en masa de tipo flujos de detritos propuestos por Sepúlveda (1998) (Tabla 2.5), modificados por Lara (2007) (Tabla 2.6) y publicados por Lara y Sepúlveda (2010) a nivel de estudio de susceptibilidad local y por Lara et al., (2018) a nivel de estudio de susceptibilidad regional. La construcción de estas tablas está detalladamente explicada dentro del capítulo 2 subtítulo 4.

Tabla 2.5: Ponderación de factores condicionantes a flujo de detritos propuesta por Sepúlveda (1998).

Factor		Ponderación (%)
Geomorfología	Pendiente de ladera	35%
	Pendiente canal de drenaje	
	Encajonamiento canal de drenaje	
	Orientación de ladera	
Geología y Geotecnia	Características geotécnicas del suelo	35%
	Profundidad nivel freático	
	Características geotécnicas de rocas	
	Grado de saturación crítico según análisis de estabilidad	
Clima y Vegetación	Acumulación de nieve	10%
	Cobertura vegetal	
Antrópico	Obstrucción de canal de drenaje por represas de tierra o rellenos	8%
	Desestabilización artificial de laderas	
Antecedentes históricos	‘Aluviones’ o deslizamientos declarados	12%

Tabla 2.6: Ponderación de factores condicionantes publicada por Lara y Sepúlveda (2010)

Factor		Ponderación (%)
Geomorfología	Pendiente de ladera	35%
	Pendiente canal de drenaje	
	Encajonamiento canal de drenaje	
	Exposición al sol	
Geología – Geotecnia	Características geológicas-geotécnicas del material	35%
	Condiciones de humedad y saturación	
Clima – Vegetación	Acumulación de nieve	10%
	Cobertura vegetal	
Antrópico	Obstrucción de canal de drenaje	10%
	Desestabilización artificial de laderas	
Antecedentes	Aluviones declarados en la hoya	10%

2.2.3.1 Factor geomorfológico

Corresponde a las características morfológicas de una ladera y del canal de drenaje de una cuenca. Estas características tales como: la pendiente; la forma de encajonamiento del cauce; la topografía y altura de las laderas inciden en la velocidad, energía y volumen de los fenómenos, donde cualquier modificación de estos puede transformar una ladera estable en inestable (Prieto, 1985; Hauser, 1993; Popescu, 2002). Además, existen características importantes a tomar en cuenta como la forma de la hoya hidrográfica y la orientación de la ladera con respecto al norte, ya que son aspectos geográficos que pueden influir por ejemplo en el tiempo de exposición solar, en el grado de humedad, presencia de vegetación, meteorización en la ladera, entre otros (Hauser, 1993; González de Vallejo et al., 2002; Das y Sivakugan, 2016; Lara, 2007; Cuanalo et al., 2011; Celis, 2018)

Una topografía escarpada y ángulos altos de pendiente son las primeras condiciones geomorfológicas por considerar por ser propicias para la generación de flujos. Pendientes mayores a 25° en las cabeceras de las hoyas hidrográficas, son favorables para el desarrollo de flujos o aluviones (Hauser, 1993), aunque algunos podrían generarse sobre pendientes menores que no sobrepasan los 15° (Sauret, 1987; Sepúlveda, 1998; Lara, 2007; Ceballos, 2016; Celis, 2018).

2.2.3.2 Factor geológico – geotécnico

La geología que compone de forma global a las laderas de una hoya hidrográfica controla la estabilidad de esta, gracias tanto a la composición y tipo de masa sensible, como también por el comportamiento geotécnico y mecánico del material que la forma (Sepúlveda, 1998; Muñoz, 2013). Esto quiere decir que el techo de una ladera y su acumulación de suelo respectiva, en conjunto de la geología del cuerpo y pie de esta (ya sea una litología o un depósito) componen a una unidad geomorfológica de ladera, donde cada parte presenta un carácter geotécnico definido.

Dentro de las características de este factor se encuentran: el tipo de depósito o tipo de roca; el material que compone a la ladera (González de Vallejo et al., 2002; Das y Sivakugan, 2016; Lara, 2007; Ceballos, 2016; Celis, 2018); en conjunto a la densidad, plasticidad; humedad y permeabilidad del material in situ (Prieto, 1985; Garrido, 1987; Hauser, 1993; Das y Sivakugan, 2016; Cuanalo et al., 2011).

Tanto la litología de la roca como sus estructuras, alteraciones y la meteorización influirán en cómo se comportará la masa detrítica removida por los flujos. La condición y orientación de las

estructuras como también la condición geotécnica del suelo es bastante relevante, encontrándose que estructuras abiertas con rellenos de minerales blandos o estructuras poco rugosas, tenderán a conformar planos de debilidad en el macizo (Varnes, 1978).

Por otro lado, estructuras en la dirección del manto del talud generarán condiciones inestables para la ladera; sin embargo, dentro de esta categoría se considera también el volcamiento o “toppling”, que se genera cuando los estratos mantean en sentido opuesto a la ladera y se “vuelcan” (González de Vallejo et al., 2002; Lara, 2007; Das y Sivakugan, 2016)

En general, los depósitos sedimentarios aluviales, coluviales, volcanoclásticos, glaciales son susceptibles a ser erosionados y transportados producto de su carácter altamente permeable, baja compacidad y presencia de finos en los cuales se favorece la superación de la capacidad de infiltración de agua, produciéndose las remociones por cuerpos de agua que aumentan su energía gracias a estas características intrínsecas en los depósitos sedimentarios (Galloway y Hobday, 1983; Selby, 1993; Naranjo y Varela, 1996; Hauser, 1993; Das y Sivakugan, 2016).

Los factores que influyen en esta categoría predominan en la condición de susceptibilidad de flujos de detritos, en conjunto a las condiciones geomorfológicas del terreno como los más relevantes.

2.2.3.3 Factor climático - vegetación

Este factor contribuye a los procesos erosivos y depositacionales en las laderas, formando geomorfológicas climáticas posteriores al transporte de un fenómeno de flujo de detritos y que pueden ser estabilizadas por la condición de vegetación que presente esa ladera.

Respecto a la climatología, los flujos de detritos de por sí no dependen directamente del tipo de clima, ya que un flujo puede tener muchas similitudes en las características geológicas en diferentes zonas climáticas (Sepúlveda, 1998), lo que no quita de que exista una mayor frecuencia o susceptibilidad en ciertas latitudes y longitudes de una porción continental (Moreiras et al., 2021).

Las condiciones climáticas que componen a este factor corresponden a: temperatura; viento; radiación solar; precipitaciones y acumulación de nieve, siendo estas últimas tres las más influyentes. En general, las situaciones climáticas más críticas asociadas a altas probabilidades de riesgo a un flujo se vinculan a la frecuencia y severidad de los fenómenos extremos como eventos de mega sequía e inundaciones (Lavee et al., 1998; Hauser, 2002; Moreiras et al., 2021). Las precipitaciones son el factor más influyente, puesto que condicionan la estabilidad del macizo, al

disminuir la resistencia de las estructuras (González de Vallejo et al., 2002). Es así como grandes eventos de flujos de detritos y barro han sido condicionados por lluvias intensas cercanas al día del evento, las que aumentan el nivel de saturación del material, disminuyendo la estabilidad de la ladera (Das y Sivakugan, 2016; Lara, 2007; Moreiras et al., 2021; Cuanalo et al., 2011).

En la actualidad, este factor ha ganado predominancia en la génesis de remociones en masa dentro de los Andes Centrales y existe una correlación lineal con la ocurrencia de eventos extremos de precipitaciones asociados a los fenómenos del cambio climático (Sepúlveda, 2006b; Moreiras et al., 2021)

Respecto a la vegetación, según Selby (1993), la vegetación contribuye a disminuir el efecto erosivo sobre las laderas, generado por factores como el clima, propiedades del suelo y la topografía. Además, permite la absorción de agua, disminuyendo el grado de saturación del suelo y ayuda a la estabilización de la ladera actuando como anclaje, dependiendo de la especie.

Sin embargo, en zonas climáticas muy lluviosas y con abundante vegetación, como la porción Andina ubicada en el sur de Chile, se han observado deslizamientos de masas de suelo con abundante vegetación tras terremotos y eventos de precipitación extremos, por lo que la ponderación y peso de este factor es subjetivo cuando los contrastes de la vegetación respecto al terreno no son tan definibles (Ceballos, 2016; Celis, 2018).

2.2.3.4 Factor antrópico

La raza humana y los procesos de antropización a la geología local de las laderas ocupan un lugar dentro de los factores condicionantes a remociones en masa, sumado al impacto indirecto del ser humano que condiciona factores como el climático, de vegetación o de humedad en el siglo XXI. La gran mayoría de la bioturbación humana o antropización es generada a depósitos o geoformas, laminaciones o estratos del Holoceno, modelados del relieve que ocurrieron hace no más de 11.700 años (Crutzen y Stoermer, 2000; Zalasiewicz et al., 2019).

Estas trazas modifican los estados tenso-deformacionales del terreno local y sus propiedades geotécnicas, modificando la capacidad de infiltración, el escurrimiento, la recepción eficiente del agua, generando inestabilidad (Prieto, 1985; Ayala, 1987; Garrido, 1987; Cuanalo et al., 2011). El estudio de estas trazas ha logrado la convención de conceptos como “ladera urbana” o antropización para la rápida identificación de la intervención del carácter natural de la geología.

Algunas de estas acciones provocan principalmente: hundimientos; caídas; deslizamientos y flujos, donde las principales causas de desestabilización son los cambios de geometría y pendiente, los cambios en las condiciones hidrogeológicas y las fuerzas estáticas externas.

Las excavaciones superficiales para vías de comunicación y transporte, boquillas de túneles, minería y otras obras varían los perfiles de equilibrio de las laderas y pueden desencadenar movimientos, dependiendo de otros factores condicionantes, como las estructuras geológicas, la resistencia o el contenido en agua del terreno. Las excavaciones más desfavorables son las realizadas al pie de las laderas, por soportar esta zona las mayores tensiones, situación frecuente en la construcción de vías de comunicación por valles o por zonas bajas de las laderas (González de Vallejo et al., 2002; Lara, 2007; Cuanalo et al., 2011). Las faenas mineras y embalses contribuyen a la generación de sismicidad inducida, lo cual puede influir en la desestabilización producto de vibraciones que no alcanzan grandes intensidades, pero pueden ser frecuentes y constantes, disminuyendo gradualmente la resistencia de depósitos y roca.

Otro efecto producido de forma indirecta por estas actividades tiene que ver con el aspecto climático. A escala global, las actividades antrópicas en el último tiempo han afectado directamente en el calentamiento global, provocando variaciones en las temperaturas, intensidad de precipitaciones, influyendo directamente en los factores que condicionan a los flujos de detritos.

El control que ejerce el factor humano sobre la estabilidad de laderas es muchas veces primordial en la generación de eventos de remoción en masa, sin embargo, la cuantificación y estudio real del impacto humano ha estado en desarrollo desde 2008 aproximadamente (Zalasiewicz et al., 2008). Sepúlveda (1998) realizó una esquematización de la relación del humano sobre la susceptibilidad de desestabilización de laderas, donde se grafica lo expuesto en este subcapítulo de forma global (Figura 2.4).

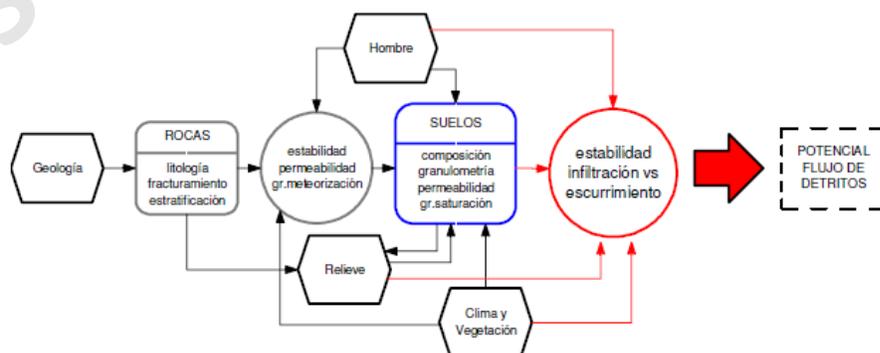


Figura 2.4: Esquema de relaciones entre los factores condicionantes, donde se incorpora el agente humano como un factor de condicionalidad de la susceptibilidad de desestabilización de laderas. Extraído de Sepúlveda (1998).

2.3 Flujos

Los flujos son procesos que afectan a una masa de suelo, en que el material está saturado de agua y puede alcanzar una concentración de partículas, tal que se comporte mecánicamente como un fluido no newtoniano (relación stress-strain no lineal), tendiendo a un comportamiento reológico de un fluido plástico viscoso. Pueden tener distintas velocidades, estados de humedad, y en muchos casos se originan por otro tipo de movimiento, ya sea un deslizamiento o una caída (Varnes, 1978).

El suelo involucrado se caracteriza en tierra o barro (>80% partículas menores a 2 mm), y detritos (20% - 80% partículas mayores a 2 mm). En donde la proporción fina controla el comportamiento de la masa, siendo la proporción crítica alrededor de 10 %. Si se tiene un valor menor a esta proporción, el flujo es de tipo granular, controlado por el choque entre las partículas. En cambio, si la porción fina es mayor a la proporción crítica, el flujo es de tipo viscoso y es controlado por el fluido intersticial (Celis, 2018)

Por otro lado, se considera la concentración de sólidos, si ésta es menor al 20% el flujo se denomina crecida de agua o inundación (Costa y Schuster, 1988); si posee una concentración entre 20% a 50% se trata de un flujo hiperconcentrado o inundación de detritos; finalmente, si la concentración es mayor al 50% se considera como un flujo de detritos (Sepúlveda, 1998).

En los Andes Centrales, tanto la actividad tectónica como el contexto climático semiárido del territorio (Lliboutry, L., 1998; Barcaza et al., 2017) promueven la erosión, transporte y desarrollo de suelo en diferentes porciones del orógeno, provocando que el mecanismo más eficiente y común para la remoción de estos sea a través de fluidización acuosa en forma de flujos de detritos (Moreiras et al., 2021).

El impacto y modificación a las características del clima dentro de la Biósfera iniciadas durante el siglo XX han modificado la frecuencia de génesis de estos fenómenos geoclimáticos en la Cordillera de los Andes. Diversos estudios locales y regionales (Sepúlveda et al., 2006a; Vergara et al., 2015; Moreiras et al., 2021) concluyen que el calentamiento global y la alteración de la altura de las isothermas afectarán a este ambiente, incrementando la frecuencia de flujo de detritos tanto para el clima occidental del océano Pacífico como también para el clima oriental Atlántico Argentino, marcando una correlación lineal con eventos de precipitaciones con intensidad y volumetría extrema. Incorporando el efecto de la población sobre la estabilidad de laderas, la probabilidad de susceptibilidad de desestabilización aumenta directamente con la tasa de población ubicada sobre las unidades geomorfológicas naturales dentro de cuencas y altos topográficos.

2.3.1 Clasificación de flujos

Los trabajos de remociones en masa publicados por Hungr et al. (2001) incluyen una clasificación actualizada de flujos basada en el material, contenido de agua, condiciones y velocidad (Tabla 2.7).

Tabla 2.7: Clasificación de flujos (Hungr et al., 2001)

Material	Contenido de agua	Condiciones especiales	Velocidad	Nombre
Limo, arena, grava, detritos (coluvios)	Seco, húmedo o saturado	Sin exceso de presión de poros. Volumen limitado	Variada	Flujo de material sin licuefacción
Limo, arena, detritos, roca meteorizada y/o poco resistente	Saturado en la superficie de ruptura	Material susceptible a licuefacción Humedad constante	Extremadamente rápida	Flujo por deslizamiento de material
Arcillas sensitivas	En o sobre el límite líquido	Licuefacción in situ Contenido constante de agua	Extremadamente rápida	Flujo por deslizamiento de arcilla
Turba	Saturado	Exceso de presión de poros	Lenta a muy rápida	Flujo de turba
Arcilla o tierra	Cerca del límite plástico	Movimientos lentos Cuerpo más rígido desliza	Moderada	Flujo de tierra
Detritos	Saturado	Canal y geoforma deposicional establecida Contenido de agua aumentado de la fuente de material	Extremadamente rápida	Flujo de detritos
Barro	En o sobre el límite líquido	Flujo de detritos de grano fino	Extremadamente rápida	Flujo de barro
Detritos	Presencia libre de agua	Inundación	Extremadamente rápida	Inundación de detritos
Detritos	Parcial o totalmente saturados	Sin encausamiento establecido Relativamente superficiales, con fuente de alta pendiente	Extremadamente rápida	Avalancha de detritos
Roca fragmentada	Variado, principalmente secos	Roca intacta en la fuente Volúmenes mayores a 10000 m ³	Extremadamente rápida	Avalancha de rocas

2.3.2 Propiedades de los flujos de detritos

En general, los tipos de flujos más comunes en ambientes semiáridos con presencia de geomorfologías tectónicas son los flujos de detritos, flujos de barro e inundaciones de detritos. Un flujo de detritos es un movimiento muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados, no plásticos (índice de plasticidad <5 %) que transcurre confinado a lo largo de un canal o cauce preexistente (Cruden y Varnes, 1996).

La diferencia principal entre un flujo de detritos y un flujo hiperconcentrado es sólo la cantidad de agua, mientras que la diferencia entre un flujo de detritos y uno de barro es la proporción de finos de la masa. Por lo tanto, si se tiene un flujo de detritos plástico, se convierte en un flujo de barro, en donde la fracción fina modifica la reología del material, entregándole un comportamiento no newtoniano (Hungry et al., 2001).

Las remociones de tipo flujo son complejas, por lo que es necesario precisar que un flujo de detritos es un movimiento en masa canalizado sobre un gran número de pequeñas superficies de cizalla mientras que una avalancha de detritos es un movimiento que se desliza sobre laderas de alta pendiente, el que puede confinarse y desencadenar un flujo (Cruden y Varnes, 1996)

Estos flujos se comportan como un fluido visco al aumentar la velocidad y disminuir la resistencia al cizallamiento (Johnson, 1970). La viscosidad de este tipo de flujo varía considerablemente según el tamaño y contenido de material detrítico, por lo que las condiciones erosivas y depositacionales de un evento de este estilo estarán supeditadas a las características internas del fluido.

2.3.3 Morfología

Los flujos durante su desarrollo presentan una morfología variable (aunque con rasgos típicos), usualmente compuestos de morfología generalmente lobular en la zona frontal, junto con ondulaciones en las partes anteriores por depositación de sucesivas oleadas (Johnson y Rodine, 1985) y depósitos bien definidos según las características internas del flujo (Figura 2.5). La figura aluvial depositacional predominante dependerá también de la geomorfología del canal de salida, el tamaño del cauce y la forma de desembocadura de los flujos superficiales.

Cuando los flujos son diferencialmente viscosos y con movimiento de grandes volúmenes de masa, estos erosionan los canales y producen geomorfologías de levées netas por el desborde del agua sobre los límites del canal (Gutiérrez, 2008), sin embargo, cuando la viscosidad de flujo es extremadamente alta, estos no presentan figuras erosivas o son muy pequeñas (Selby, 1993).

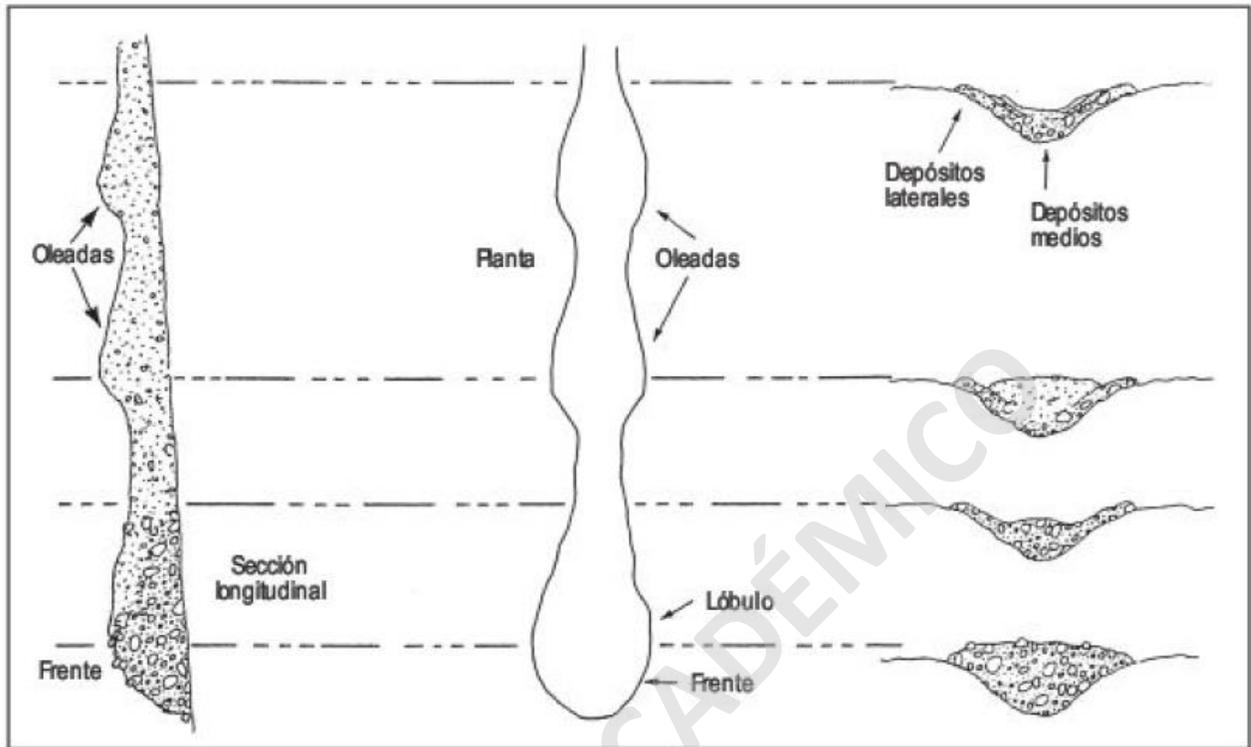


Figura 2.5: Morfología esquemática lateral, de planta y frontal de un flujo (Johnson y Rodline, 1984)

En estos pulsos se presentan zonas donde priman distintos mecanismos de transporte de material fino y granular, niveles de energía y volumen de material (Celis, 2018), donde la estructura interna es comúnmente masiva con grandes clastos distribuidos aleatoriamente en una matriz de grano fino, con presencia de estructuras lenticulares limosas provenientes de partes más fluidas de la corriente de flujo. Además, existe una variación de las fases proximales respecto a las fases distales de los abanicos, presentando una variación grano decreciente de los clastos desde techo a base, manteniendo la granulometría de la matriz.

Posterior a la depositación y asociada al techo de la columna del flujo, las porciones de cabecera comprenden una nivelación en el plano según las condiciones erosivas denominada glacis o depósitos de piedemonte, marcando la diferencia de pendiente entre el desarrollo de suelo sobre geomorfologías de exhumación rocosa o el desarrollo de suelo compuesto por los mismos detritos.

La figura 2.6 esquematiza tanto la vista en planta de un lóbulo de abanico aluvial con sus respectivas características, como también una separación de los depósitos encontrados en una sección y las facetas erosivas que se pueden desarrollar sobre o adyacente al área de depositación.

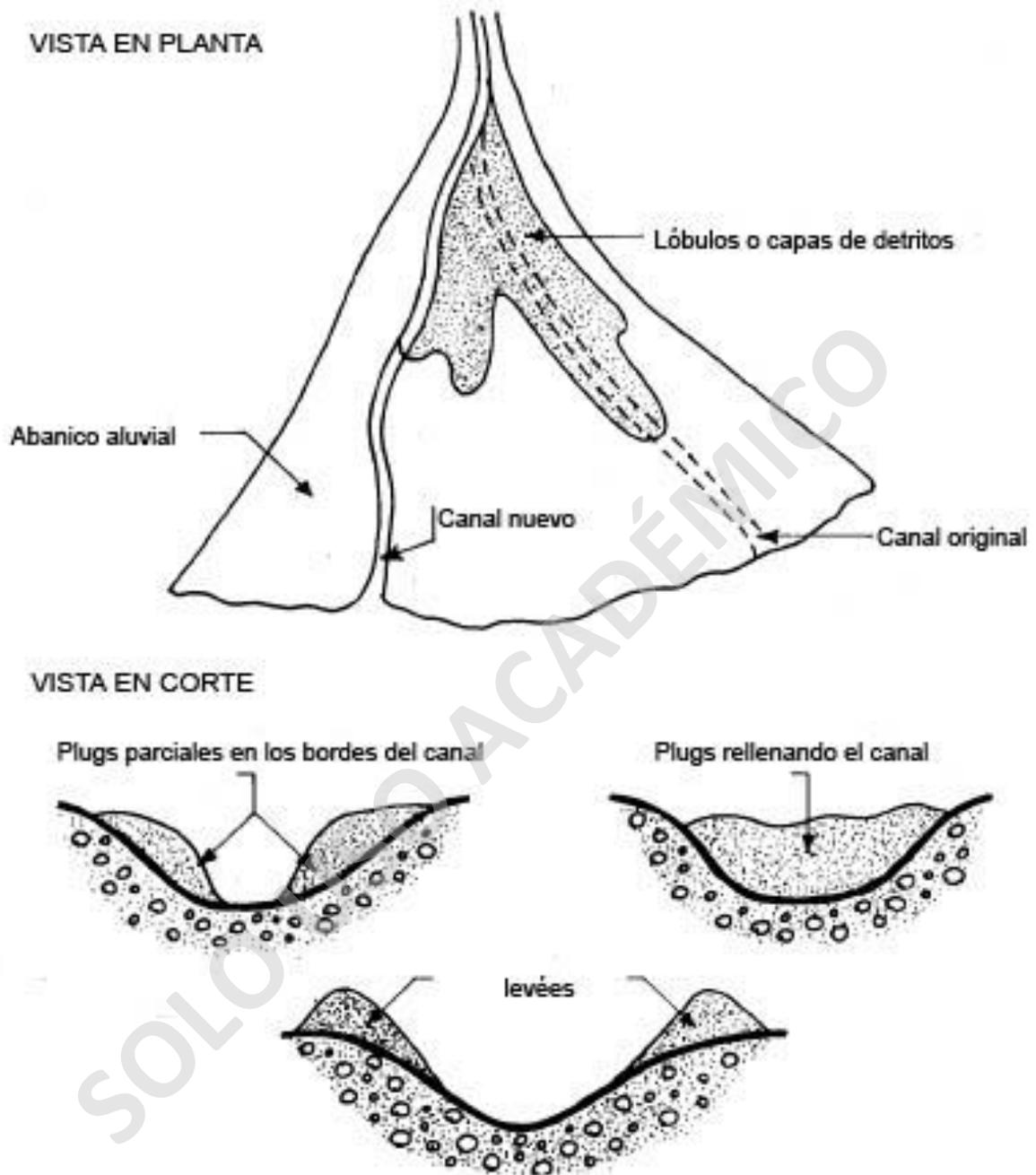


Figura 2.6: Tipos de depósitos generados por flujos. Modificado de Van Dine (1996) y extraído de Lara (2007).

2.3.4 Modelos hidráulicos para flujos

Los flujos de detritos se comportan mecánicamente como un fluido no-newtoniano, ya que a medida que aumenta la cantidad de sólidos transportados y la densidad de la mezcla sobrepasa la densidad del agua, la resistencia a la deformación crece, de tal forma que la relación entre tensión

de corte y tasa de deformación es no-lineal. En cambio, en un fluido newtoniano esta relación es lineal (Celis, 2018).

Si la concentración de finos (tamaño limo o arcilla) supera el 10 %, el fluido intersticial lubrica los granos y controla la dinámica de la mezcla, por lo que para un bajo tamaño de partículas la viscosidad domina en la mecánica de ésta (Costa y Schuster, 1988). Se reconocen dos modelos que permiten simular la resistencia de un flujo de detritos para estas concentraciones: Modelo de Bingham y el Modelo de Herschel-Bulkley.

Por otra parte, si los finos son menos del 10 %, el control está dominado por el contacto entre los granos, siendo las fuerzas inerciales quienes adquieren mayor relevancia (Costa y Schuster, 1988). En este caso el Modelo de Bagnold permite simular la resistencia, dado que asume colisión entre granos y no considera tensión de fluencia.

Estudios recopilatorios como los publicados por Bono (2014) y Muñoz (2018) compilan la definición de diferentes modelos hidráulicos para flujos con sus respectivas ecuaciones y parámetros de resistencias al cizalle.

2.3.5 Efecto del agente humano en factores que condicionan la susceptibilidad de flujos

Los procesos de antropización como se ha señalado anteriormente, son de gran escala y conllevan un impacto directo a la Geología de los territorios, principalmente a la estabilidad de laderas, forma de los suelos y al relieve Holoceno. El impacto humano indirecto también es relevante de analizar, ya que la condicionalidad de génesis de los flujos también se ha visto afectada producto de eventos climáticos anómalos, donde la raza humana ha sido un catalizador de la modificación de los ciclos naturales (principalmente los ciclos climáticos, como el ciclo del agua) y de la alteración de la variabilidad intrínseca de estos eventos. El cambio climático y la creciente preocupación por la cuantificación del impacto humano tanto directo como indirecto ha dado alza a identificar los efectos de estos procesos contemporáneos en diversos factores que condicionan la estabilidad de las unidades geológicas.

A continuación, se recopilan los efectos de alteración principal generados por el humano hacia los factores condicionantes definidos en los estudios de susceptibilidad de desestabilización de laderas. Este subtítulo actúa como sustento de los capítulos posteriores del estudio de susceptibilidad a remociones en masa.

Tabla 2.8: Recopilación de los efectos de producidos (directa e indirectamente) por el agente humano sobre los factores condicionantes para flujos de detritos (Sepúlveda, 1998; Lara, 2007) asociados a la caracterización geomorfológica de laderas y su inestabilidad.

Factor	Desglose individual	Impacto directo del agente humano en la inestabilidad de laderas	Impacto indirecto del agente humano en la inestabilidad de laderas
Geomorfología	Pendiente de ladera	Alteración de pendientes a geomorfologías estructurales, dinámicas y climáticas. (González de Vallejo, 2002; Cuanalo et al., 2011)	Efecto de sobrepoblación y modificación de territorio para asentamiento humano, sobreconsumo de recursos naturales y procesos de extracción y alteración geomorfológica (Crutzen y Stoermer, 2000; Caballero, 2011; Cuanalo et al., 2011).
	Pendiente canal de drenaje	Impacto estratigráfico a geomorfologías dinámicas y erosivas, principalmente asociada hacia las figuras fluviales como la pendiente de los cauces. (González de Vallejo, 2002; Cuanalo et al., 2011)	Alteración de procesos de erosión y sedimentación natural por ramificación de aguas hacia condominios o infraestructura humana que disminuyen el volumen de agua (Milevski, 2011; Tran et al., 2011; Chu, 2014; Anh et al., 2021; Hansen et al., 2022; Cuanalo et al., 2011).
	Encajonamiento canal de drenaje	Impacto estratigráfico a geomorfologías dinámicas erosivas y depositacionales, principalmente asociada hacia las figuras fluviales como el encajonamiento de los cauces o modificación del patrón de redes de drenaje. (González de Vallejo, 2002; Cuanalo et al., 2011)	Alteración de procesos de erosión y sedimentación natural por ramificación de aguas hacia condominios o infraestructura humana que disminuyen el volumen de agua (Lavee et al., 1998; Cuanalo et al., 2002; Milevski, 2011; Tran et al., 2011; Chu, 2014; Anh et al., 2021; Hansen et al., 2022; Cuanalo et al., 2011)
	Exposición al sol	Alteración de pendientes a geomorfologías estructurales, dinámicas y climáticas. (González de Vallejo, 2002; Cuanalo et al., 2011). Coberturas antrópicas generadas por mallas, concretos, sombras de edificio, maderas prensadas entre otro tipo de basura (Das y Sivakugan, 2016)	No existe un efecto indirecto principal, ya que este factor depende de la orientación de las laderas y al sol.

Tabla 2.9: Recopilación de los efectos producidos (directa e indirectamente) por el agente humano sobre los factores condicionantes a flujos de detritos (Sepúlveda, 1998; Lara, 2007) asociados a la caracterización geológica y geotécnica de laderas y su inestabilidad.

Factor	Desglose individual	Impacto directo del agente humano	Impacto indirecto del agente humano
Geología-Geotecnia	Características geológicas-geotécnicas del material	<p>Modificación de la tensión, cohesión y plasticidad de las laderas por sobre compresión de infraestructuras humanas.</p> <p>Exposición de planos de debilidad.</p> <p>Modificación de la tensión intersticial de granos, condiciones de infiltración de aguas (Wilmschurst, 1997; Lavee et al., 1998; Grieve, 2001; Gonzáles de Vallejo, 2002; Das y Sivakugan, 2016; Rainato et al., 2018; Marchi et al., 2019; Boretto et al., 2021).</p>	<p>Meteorización y erosión de suelos por tránsito humano.</p> <p>Alteración de procesos de erosión y sedimentación natural. (Lavee et al., 1998; Das y Sivakugan, 2016; Rainato et al., 2018; Marchi et al., 2019; Boretto et al., 2021).</p>
	Condiciones de humedad y saturación	<p>Coberturas antrópicas generadas por mallas, concretos, sombras de edificio, maderas prensadas entre otro tipo de basura.</p> <p>Alteración del ciclo hidrológico por ramificación de aguas hacia condominios que disminuyen el volumen de agua (Cambios como la disminución en las tasas de recarga y de precipitación mensual principalmente) (Lavee et al, 1998; Cuanalo et al., 2002; Das y Sivakugan, 2016; Lear, C et al., 2021).</p>	<p>Alteración del ciclo hidrológico por aceleración de cambio climático (Cambios como la disminución en las tasas de recarga y de precipitación anual principalmente) (Lavee et al., 1998; Pierson, 2005; Das y Sivakugan, 2016)</p>

Tabla 2.10: Recopilación de los efectos producidos (directa e indirectamente) por el agente humano sobre los factores condicionantes a flujos de detritos (Sepúlveda, 1998; Lara, 2007) asociados a la caracterización climática, vegetativa y de antecedentes de flujos en laderas y su inestabilidad

Factor	Desglose individual	Impacto directo del agente humano	Impacto indirecto del agente humano
Clima – Vegetación	Acumulación de nieve	No existe un efecto directo principal, ya que este factor depende de las condiciones atmosféricas. En ciertos sectores industriales montañosos (China), la acumulación de nieve y su ciclo puede ser alterado por la removilización de sedimento dentro de las cadenas y sus laderas (Lear et al., 2021).	Desertización en América del Sur. Disminución de las precipitaciones, aumento en la probabilidad de lluvias intensas aumento en la altura de la línea de nieves (Lavee et al., 1998; Garreaud, 2011; Malmros et al., 2018; Saavedra et al., 2018; Cordero et al., 2019),
	Cobertura vegetal	Meteorización y erosión de suelos por tránsito humano. Efecto de deforestación por tránsito en sectores de vegetación pobre o débil (Wilmshurst, 1997; Lavee et al., 1998; Rainato et al., 2018; Marchi et al., 2019; Boretto et al., 2021; Lear et al., 2021).	Desertización en América del Sur. Disminución de las precipitaciones, aumento en la probabilidad de lluvias intensas aumento en la altura de la línea de nieves (Lavee et al., 1998; Garreaud, 2011; Malmros et al., 2018; Saavedra et al., 2018; Cordero et al., 2019),
Antecedentes	Aluviones declarados en dentro de los Andes Centrales	Modificación de las características de ladera que condicionan a eventos de flujos de detritos (. (Cuanalo et al., 2002; Cuanalo et al., 2011; Muñoz, 2018; Este trabajo).	Correlación de desencadenamiento de eventos de flujos de detritos respecto a alteración en intensidad de precipitaciones provocado por el cambio climático. (Lavee et al., 1998; Sepúlveda et al., 2006a; Moreiras et al., 2021).

De forma general, las necesidades del ser humano han provocado la utilización y modificación de su propio entorno de forma directa, alterando en gran parte los ciclos naturales regionales presentes y que conforman a los sistemas de la Tierra.

Geológicamente hablando, el impacto del ser humano afecta directamente a los patrones y figuras geomorfológicas que construyen el relieve. Una unidad geomorfológica de tipo ladera puede fácilmente cambiar su orientación respecto al sol o su pendiente, ya que las labores u proyectos que involucran un impacto estratigráfico profundo a las geomorfologías (estructurales, dinámicas y climáticas), cuentan con el presupuesto y la tecnología para modificar la topografía a su antojo. Estos cambios e intervenciones topográficas modifican sustancialmente las características naturales que sostienen las laderas y que, en conjunto, crean las figuras geomorfológicas de mayor envergadura como las cuencas hidrográficas. Estudios como el de González de Vallejo et al. (2002); Rainato et al. (2018); Marchi et al. (2019) y Boretto et al. (2021) notan modificaciones en características como la tensión, cohesión y plasticidad de los terrenos, generadas principalmente por el agente humano, la infraestructura antrópica y los procesos de removilización de sedimento. Otro de los factores geológicos al cual se impacta tanto directa como indirectamente en el corto plazo son las condiciones de humedad y saturación. Las condiciones de humedad y saturación dependen intrínsecamente tanto de los ciclos naturales a gran escala como la condición de las laderas, localmente. Estudios como Pierson (2005) o Lear et al. (2021) sugieren que la condición de humedad y los niveles de saturación disminuyen ante coberturas y aislamiento antrópico de laderas, como también por la modificación de los volúmenes de agua por el aprovechamiento de las personas sobre el recurso y la modificación del ciclo. El efecto indirecto del ser humano en la frecuencia de precipitaciones altera el ciclo hidrológico, principalmente en la disminución de tasas de recarga que pueden modificar la humedad media y saturación de agua media (Lavee et al., 1998).

2.4 Antecedentes para la evaluación de peligro de flujo de detritos

Los inicios de los estudios de análisis de susceptibilidad a remociones en masa son bastante recientes y fueron establecidos en los Estados Unidos, exactamente en el estado de California. Bonilla et al. (1972) presenta la primera metodología cualitativa simplificada de análisis de susceptibilidad a remociones en masa donde posteriormente en el artículo de Newman et al. (1978), utilizando la misma metodología que sus colaboradores, se publicó el primer mapa de susceptibilidad de remociones en masa utilizando sistemas de georreferencia y software dentro de

las geociencias, marcando la piedra angular al implemento de softwares cartográficos y de georreferencia más avanzados.

2.4.1 Enfoques metodológicos para la evaluación peligros y riesgos geológicos

Abordando los tipos y aspectos de las metodologías más importantes publicadas para el estudio de remociones en masa, se definen 3 diferentes enfoques metodológicos para la evaluación de flujos:

2.4.1.1 Metodología cualitativa

Para la realización de un mapa de susceptibilidad de remociones en masa en los comienzos de la utilización de softwares y sistemas de georreferencia se consideraba un enfoque cualitativo simplificado del trabajo. Esta metodología de trabajo es capaz de generar mapas de exposición, mapas de peligro y delimitación de zonas afectadas, teniendo solo en cuenta la expertíz de los profesionales respecto al diseño urbano y a las características geológicas del terreno.

2.4.1.2 Metodología semicuantitativa

Posterior a las metodologías cualitativas, los enfoques de trabajo evolucionaron incluyendo nuevos aspectos y nuevas variables pasando a ser metodologías semicuantitativas. Estas metodologías son capaces de generar mapas de movimiento superficial, mapas de peligros geológicos, integrar modelos predictivos opcionalmente y generar mapas de susceptibilidad de remociones en masa base con la integración de 2 variables principales: Topografía y meteorización del terreno (Gokceolglu et al., 2000; Kong, 2002; Pathak y Nilsen, 2004).

2.4.1.3 Metodología cuantitativa

En la actualidad, los trabajos de análisis de flujos publicados constan principalmente del trabajo de una metodología cuantitativa, las cuales se centran en los datos experimentales del terreno analizado. Este tipo de trabajo integra una larga data de información obtenida de modelos predictivos propios o anexos, donde se realiza un análisis multivariable de los fenómenos geológicos. Además, algunos estudios cuentan con la integración de modelaciones más innovadoras, aplicando metodologías determinísticas (donde se trabaja con la información más actualizada del sector analizado) y probabilísticas, en la cual se trabaja con un campo muestral

obtenido a través del tiempo o a través de pruebas realizadas y registradas en una base de datos (Padilla, 2006).

2.4.1.3 Metodología mixta

Esta metodología tiene un carácter cualitativo al identificar los principales factores condicionantes para la generación de remociones en masa, incluyendo una parte cuantitativa al otorgar a cada factor una ponderación que en conjunto permite estimar un grado de susceptibilidad de ocurrencia del fenómeno en zonas cordilleranas.

Los trabajos implementados en el mundo que son mayormente utilizados por la comunidad científica utilizan este tipo de metodologías por su buena apreciación visual de los datos obtenidos y la facilidad en la comparación estadística de los mapas, donde los modelos de clasificación y ponderación de variables (Cómo los modelos heurísticos de análisis espacial multicriterio, el análisis jerárquico de variables, modelos de aproximación heurística, cálculo de peso en variables estadísticas, cálculo de factor de seguridad de ladera por reclasificación de variables geológicas, reclasificación tipo Tier, entre otras) han sido los más útiles y con mayor diferencia dentro de las variables al momento de obtener resultados y discusiones.

Otro de los aspectos de importancia que presenta este enfoque complementario es que los argumentos y productos geológicos para una correcta distribución de los territorios continentales (bajo el alero del Peligro y Riesgo Geológico) deben ser actualizados a cabalidad del contexto local, producto de que estas basan la jerarquización del factor antrópico de la época en la que se generaron. Al tratarse de fenómenos naturales, este peligro no se puede eliminar, pero se puede disminuir la vulnerabilidad de la población expuesta a estos procesos, reduciendo así el riesgo geológico, o mitigar de alguna forma el daño que estos podrían generar (Celis, 2018).

Los métodos mixtos de jerarquización para la evaluación de susceptibilidad de remociones en masa hechos en Chile corresponden al estudio de Sepúlveda (1998); Lara (2007); Martínez (2009); Lara y Sepúlveda (2010); Territorio y Ciudad Consultores (2013) y Ferrando (2014), entre otros.

2.4.2 Antecedentes teóricos para la evaluación de susceptibilidad a flujos de detritos

Para analizar la susceptibilidad de peligro a flujo de detritos en un lugar determinado, es fundamental evaluar tanto los factores condicionantes como los factores desencantes del sector,

dado que la característica heterogénea de la Geología provoca que las unidades geomorfológicas de ladera presenten diferente probabilidad de falla o afectación por factores disparadores como sismos, lluvias o actividad antrópica (Sepúlveda, 1998; Lara, 2007; Celis, 2018)

En este trabajo se utiliza una metodología semicuantitativa (Lara, 2007), la que permite resultados menos subjetivos que las metodologías cualitativas simplificadas, donde además se le suma un apéndice con un análisis del factor antrópico predominante en el Evento del Antropoceno.

La metodología publicada se basa en que cada grupo de factor condicionante de flujo de detritos posee un peso (en porcentaje o puntos) que define su grado de importancia en la generación del evento. Sepúlveda (1998) y posteriormente Lara (2007) asignan un peso numérico a cada uno de los factores de acuerdo con su grado de incidencia en la generación de aluviones, considerando que en general, las características geológicas, geotécnicas y geomorfológicas son las más relevantes en este aspecto. La tabla de ponderaciones porcentuales actual y publicada para cada tipo de factor condicionante corresponde a la tabla 2.6.

Las ponderaciones desglosadas presentadas en la tabla 2.11 y 2.12, corresponden al máximo porcentaje otorgado al factor, es decir, el caso más crítico para generar la remoción, bajo el cual la suma de todos ellos corresponde a un 100% o 100 puntos (Sepúlveda, 1998; Lara, 2007). De esta manera, el índice de susceptibilidad para cada unidad geomorfológica se calcula mediante la ecuación 2.1:

$$\text{ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDAD (IS)} = \left(\sum_{i=1}^{11} f_i \right) * f_{12} \quad (2.1)$$

Donde f_i corresponde a la sumatoria de todos los puntajes obtenidos de los 11 factores condicionantes diferentes, puntaje el cual está multiplicado por el 12avo factor correspondiente al tipo de material de la ladera.

En el caso de cualquier unidad asociada sólo a roca entregará un $IS = 0$, pues $f_{12} = 0$. Debe tenerse en cuenta, que las zonas que geológicamente representan unidades de roca pero que presentan suelo superficial de espesor >1 m -1,5 m deberán tener siempre un $f_{12} = 1$, pues podrían generar tanto deslizamientos superficiales de suelo como deslizamientos de roca y/o caídas de roca que luego pueden desencadenar en un flujo dependiendo de la cantidad de agua disponible (Sepúlveda, 1998).

Tabla 2.11: Puntaje de factores condicionantes de flujo de detritos para cálculo de IS. Modificado de Lara (2007) y Lara y Sepúlveda (2010)

Factor	Especificaciones	Condición	Puntaje
Ángulo de ladera (f_1)	Promedio dentro de la unidad	10° - 15°	3
		15° - 20°	6
		20° - 25°	9
		25° - 30°	11
		30° - 40°	13
		>40°	15
Ángulo de canal de drenaje al pie de la ladera (f_2)	Promedio dentro de la unidad. Si la unidad es sólo un canal de drenaje, este factor se asocia a f_1	<5°	1
		5°-10°	5
		>10°	10
Encajonamiento del canal de drenaje (f_3)	Relación profundidad / ancho Encajonamiento alto corresponde a valores >0,7	Bajo	1
		Medio	4
		Alto	7
Exposición al sol (f_4)	Bajo: Laderas que miran al sur	Baja	0
	Parcial: Laderas que miran hacia el oeste o el este	Parcial	2
	Alta: Laderas que miran hacia el norte.	Alta	3
Características geológicas-geotécnicas del material de ladera (f_5)	Condiciones muy favorables: Baja compacidad, permeabilidad y espesores críticos de suelo, presencia de estructuras y finos. En roca, alta meteorización, bajo GSI, litología y alteraciones	Muy poco favorable	3
		Poco favorable	8
		Parcialmente favorable	13
		Favorable	18
		Muy favorable	25
Condiciones de humedad y saturación (f_6)	Capacidad de saturación, almacenaje de agua y variaciones estacionales de humedad. Alta saturación y almacenaje son favorables para la generación de flujos	Sin antecedentes	2
		Poco favorable	3
		Favorable	7
		Muy favorable	10

Tabla 2.12: Puntaje de factores condicionantes de flujo de detritos para cálculo de IS (continuación). Modificado de Lara (2007) y Lara y Sepúlveda (2010)

Factor	Especificaciones	Condición	Puntaje
Acumulación de nieve (f ₇)	Según estacionalidad	Nula	0
		Esporádica	1
		Estacional	2
		Siempre	5
Vegetación (f ₈)	Densidad en la ladera	Alta	0
		Moderada	3
		Baja a nula	5
		No observada	0
Obstrucción del canal de drenaje (f ₉)	No considera estructuras destinadas a contener flujos	Baja	2
		Moderada	4
		Importante	5
Desestabilización artificial de laderas (f ₁₀)	Por ejemplo, cortes artificiales en laderas, construcción de terraplenes, etc.	No observada	0
		Poco importante	3
		Importante	5
Aluviones declarados en la hoya hidrográfica (f ₁₁)	Información escrita y/u observación de depósitos de flujos. Eventos frecuentes con recurrencia mayor a 10 años.	Sin antecedentes	1
		Prehistóricos	4
		Históricos poco frecuentes	7
		Históricos frecuentes	10
Tipo de material (f ₁₂)	La característica de afloramiento rocos no está en estudio, por lo tanto, pondera por 0 al resto de los factores.	Roca (< 1 - 1,5 m de suelo)	0
		Suelo	1

3 Formulación teórica de la metodología para la evaluación de susceptibilidad de flujos de detritos con enfoque antrópico

3.1 Esquema general

Dentro de este capítulo se encuentra descrita de forma detallada la metodología general propuesta por este estudio, la cual está dividida en 2 partes compuestas por 8 fases diferentes (Figura 3.1).

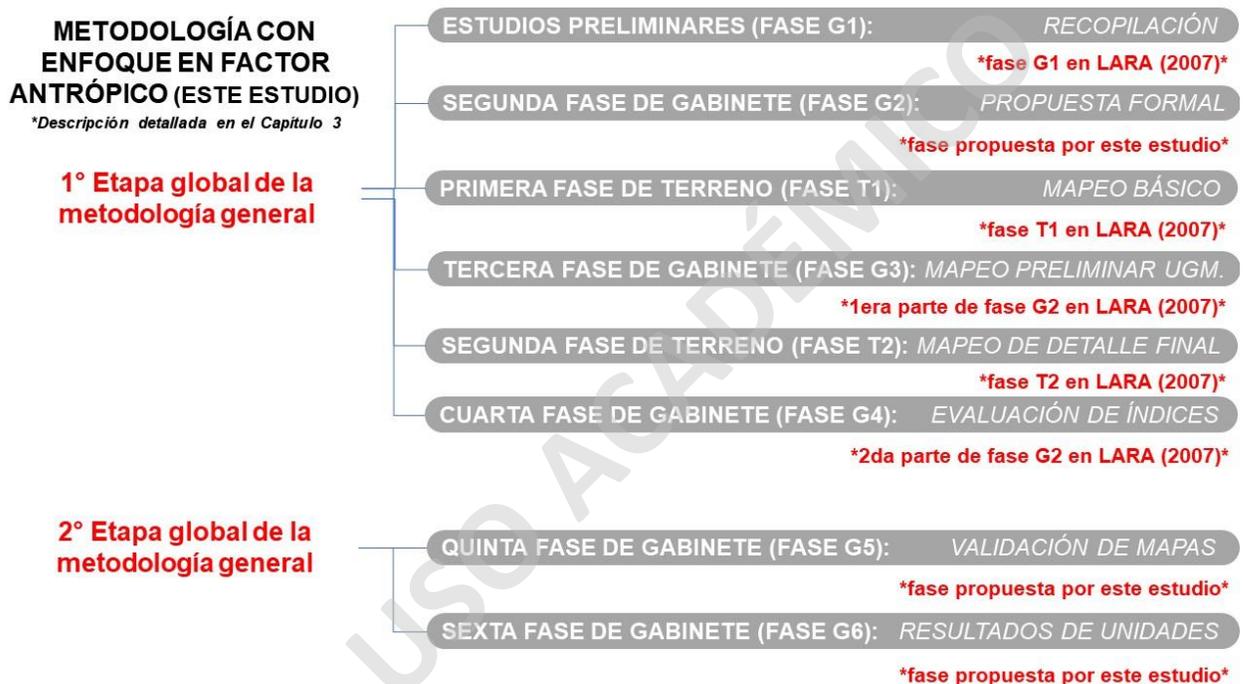


Figura 3.1: Esquema general de la metodología para el análisis y reformulación del factor antrópico dentro de metodologías para la evaluación de susceptibilidad de flujos.

La actualización metodológica desarrollada en este trabajo nace en primer lugar respecto al análisis y formulación de los factores condicionantes definidos dentro de las diferentes metodologías de evaluación de susceptibilidad a flujos de detritos. Día a día se desarrollan nuevos estudios con enfoques geomorfológicos; geotécnicos; climatológicos y antrópicos que pueden ser adosados como evidencia para la mejoría, actualización y reconceptualización de los diferentes factores definidos en estas. Esta metodología también tiene un fin de actualización conceptual teórica y de fórmulas para el cálculo de susceptibilidad respecto al impacto de la raza humana sobre la geología del territorio continental, haciendo una mezcla y selección de las diferentes tareas que son

realizadas en la bibliografía de remociones en masa, centrada principalmente en Chile. En la primera etapa global de este trabajo, fue electa la metodología jerárquica para la evaluación de susceptibilidad de remociones en masa con enfoque geológico-geotécnico de flujos de detritos creada por Sepúlveda y desarrollada por Lara (2007) para su modificación, la cual está orientada a otros fenómenos como deslizamientos en roca, suelo y caída de rocas. Las fases de trabajo propuestas son el producto final de la integración, modificación y eliminación de los diferentes trabajos de remociones en masa realizados tanto de forma local como regional, pero el trabajo de Lara (2007) es el pilar fundamental para la evaluación de flujos.

Como se aprecia en la tabla 3.1, el método a modificar está subdividido originalmente en 6 fases de gabinete, 2 fases de terreno y 1 fase de laboratorio. El desarrollo de esta metodología incorpora a tareas provenientes de las fases: G1; T1; G2; T2 y L1. Las fases: G3, G5 y G6 no son utilizables producto de la diferencia de enfoques (teórico, probabilístico y determinístico versus teórico y estadístico respectivamente). Posterior al filtro de tareas, se puede proponer una metodología jerárquica-heurística actualizada para el análisis del factor antrópico.

Tabla 3.1: Modificación de fases a la metodología columnar para evaluación de susceptibilidad de flujos.

Fases en Lara (2007)	Actividades	Modificación (Este estudio)
Estudios preliminares de gabinete (G1)	Definición de zona de estudio (a escala de hoya hidrográfica) y zonas de baja pendiente (<10°).	Se realizan ambas tareas y se incorpora una tercera de recopilación bibliográfica.
Terreno, fase I (T1)	Mapeo geológico y estructural básico.	Se realizan ambas tareas y se incorpora una tercera de mapeo de trazas humanas de gran escala
Trabajo de gabinete (G2)	Definición de unidades geomorfológicas y evaluación de susceptibilidad de flujos de detritos.	Se realizan ambas tareas, pero son ejecutadas en fases de gabinete diferentes.
Terreno, fase II (T2)	Muestreo de roca y/o suelo y mapeo estructural de detalle a escala ladera.	Se realizan ambas tareas y se incorporan una tercera de mapeo de trazas humanas de pequeña escala.
Análisis de laboratorio (L1)	Ensayos de cuantificación y caracterización geotécnica de suelo y roca.	Solo se realizan las tareas de ensayos simples (humedad y granulometría).
Trabajo de gabinete (G3)	Evaluación de probabilidad de falla.	No se realiza una evaluación de probabilidad de falla.
Trabajo de gabinete (G4)	Determinación de alcance de las potenciales remociones.	No se realiza una determinación de alcance. Realizada por Celis (2018).
Trabajo de gabinete (G5)	evaluación de probabilidad de ocurrencia de agentes gatillantes.	No se realiza una evaluación de probabilidad de ocurrencia.
Trabajo de gabinete (G6)	Evaluación de peligro geológico para cada unidad definida.	No se realiza una evaluación de peligro geológico.

La conceptualización de la metodología de Lara (2007) presenta 2 formas de modificación: se utiliza la fase completa y/o se incorporan nuevas tareas a desarrollar con un enfoque antrópico, o no se utiliza la fase (Por diferencia de enfoques o por datos y testeos ya existentes). Por ejemplo, la fase G1 de este estudio debe incorporar trabajos de gabinete preliminares como los propuestos en Lara (2007), pero también debe incluir una recopilación de estudios sobre alteración de factores producto del impacto humano para lograr el objetivo de estudio. Respecto a modificaciones, la etapa de gabinete G2 original, la cual se divide tanto por la definición final de unidades geomorfológicas de la hoya (fase G3 de este trabajo) como por la evaluación de susceptibilidad a remociones en cada unidad (fase G4 de este trabajo), provoca que la segunda fase descriptiva de terreno (T2 en la metodología original) sea posterior a la evaluación de susceptibilidad. Es por esta razón que se modificó y se separó esta segunda fase de gabinete en 2 etapas individuales retrasando el trabajo de evaluación de flujos bajo la segunda fase de terreno, con el objetivo de incorporar una definición preliminar y final de unidades geomorfológicas utilizando toda la información geológica recopilada desde las etapas de terreno. Finalmente, existe un producto de alcance de posibles remociones publicado por Celis (2018) el cual integra la metodología de Lara (2007), por lo cual esta tarea ubicada en la fase G4 original es catalogada como una recopilación atingente a la primera fase de gabinete y no es seleccionada como una fase de resultados.

Como integración de todas las modificaciones y mezcla de tareas respecto al método original, se puede desarrollar una propuesta con la finalidad de analizar la flexibilidad y variación visual de los parámetros aritméticos dentro de los mapas para la evaluación de susceptibilidad de flujos.

Los cambios dieron resultado a una propuesta metodológica compuesta por 8 etapas que mezclan tareas con enfoques diferentes, provenientes tanto de estudios previos en la zona como de tareas con un enfoque antrópico, en línea a este trabajo. La metodología de este trabajo contempla de forma resumida: Fase G1 como etapa de recopilación de información geológica y geotecnia con enfoque natural y antrópico; Fase G2 como etapa de definición de la propuesta formal de reformulación conceptual y reponderación aritmética de los factores condicionantes dentro de la metodología seleccionada; Fase T1 como fase inicial de recopilación de datos de campo con enfoque geológico y antrópico; Fase G3 como etapa de separación individual de laderas preliminar dentro de la cuenca seleccionada; Fase T2 como fase final de recopilación de datos de campo, centrada principalmente en la definición final y corroboración de los límites mapeados en las laderas respecto a las unidades geomorfológicas propuestas preliminarmente mediante la

descripción y corroboración de información digital in situ; Fase G4 como fase de evaluación del índice de susceptibilidad de la quebrada, mediante la utilización tanto de las propuestas aritméticas de la metodología seleccionada y las desarrolladas por este estudio; Fase G5 como fase de generación de mapa y validación de la base de datos asociada al cálculo del índice de susceptibilidad en laderas y G6 como etapa de recopilación y definición final de resultados estadísticos a utilizar dentro de la fase de discusión mediante la caracterización de laderas como “naturales” e “intervenidas”. Esta separación en la última etapa de gabinete tiene como fin generar un objeto de estudio como evidencia para la cuantificación y calificación del impacto antrópico mediante comparaciones estadísticas y geológicas entre las unidades geomorfológicas descritas, las cuales estarán previamente sectorizadas en las zonas acotadas para una descripción local rápida de la hoya. Es importante notar que la validación de las fórmulas es imperante en esta etapa, ya la definición de los últimos objetos en estudio que formarán parte de la evidencia debe estar relacionados a la fórmula que presente el menor error estadístico respecto a las modificaciones aritméticas de la propuesta desarrollada por Lara (2007)

Habiendo cumplido con todas las actividades propuestas en las diferentes fases de resultados, es válido la aplicación del análisis y discusión geológica de los datos recopilados. Esta fase de discusión debe cumplir con un orden específico para poder comenzar correctamente el análisis de laderas críticas y naturales: análisis y comparación estadística de los puntajes de IS asociados a los diferentes mapas generados; el análisis geológico y comparación respecto a las descripciones geotécnicas y geológicas de las unidades (Unidades críticas y naturales); el análisis y comparación visual de los diferentes mapas de susceptibilidad producidos con las formulaciones aritméticas; el análisis y comparación de las descripción estadística entre las diferentes formulaciones utilizadas (factor de desviación estándar, coeficiente de correlación, entre otros) para finalizar con la superposición de los productos geocientíficos vectoriales que trazan tanto las diferentes evidencias de impacto antrópico en la cuenca como los índices de susceptibilidad calculados.

3.2 Estudios preliminares de gabinete (G1)

Los estudios preliminares de gabinete fundan la base de un proyecto de envergadura geológica. Esta primera parte contempla la selección de la zona de estudio, su escala y la recopilación de información y antecedentes atinentes a la propuesta metodológica de este proyecto. En este caso particular, la fase preliminar consta de la recopilación principalmente de antecedentes: geológicos;

estructurales; geomorfológicos; geotécnicos; climáticos y antrópicos de carácter regional y local para la evaluación primaria y secundaria de susceptibilidad de flujos dentro de la zona de estudio escogida, mediante la revisión bibliográfica, prensa, fotografías aéreas, mapas, cartas geológicas, cartas hidrográficas, entre otros. Esta recopilación de información debe ser completada, reanalizada y corroborada en las fases descriptivas de terreno. Uno de los productos geocientíficos predominantes a recopilar son las imágenes tipo ráster. Los ráster corresponden a imágenes satelitales cuyos píxeles contienen variados set de datos, las cuales pueden ser utilizadas para la definición de: pendientes de ladera; pendientes de cauces; humedad de ladera; vegetación preliminar por temporada climática, etc.

Los trabajos de gabinete que deben ser efectuados para la reformulación del factor antrópico en una primera parte, es la definición de escala para una correcta resolución de los productos geocientíficos y las trazas antrópicas, las cuales son trazables mas no mapeables a la escala de la cuenca. Además, se deben identificar características preliminares del sector de estudio dentro de la bibliografía geológica, ya sean los factores condicionantes, gatillantes o las características geológicas del sector. Este estudio sugiere la utilización de datos estadísticos nacionales para que las modificaciones propuestas en esta metodología sean lo más objetivas posibles.

En el momento de comenzar el trabajo cartográfico preliminar propio, se deben descartar las zonas de baja pendiente, las cuales no presentan una condición de diferencia energética para tener una susceptibilidad de cualquier remoción de tipo flujo. De acuerdo con la revisión bibliográfica, las laderas con pendientes menores a 10° serán descartadas del estudio, ya que las condiciones de energía potencial y energía cinética en este tipo de laderas es extremadamente baja o nula.

Finalmente, uno de los trabajos clave para el sustento de las reformulación conceptual y reponderación de factores dentro de esta etapa es la recopilación bibliográfica del tópico geotécnico, geomorfológico, hidrológico y de vegetación, que incluya estudios con enfoques cuantitativos y cualitativos del impacto humano en estos conceptos, para formar una base que fundamente la variación y modificación de la metodología original. Todos los datos y bibliografía del impacto humano sobre factores que condicionan la susceptibilidad de flujos de detritos son recopilados dentro del segundo capítulo de este estudio, incluidos en el subtítulo de factores condicionantes como sustento preliminar de las propuestas para este trabajo. Dentro de la tabla 3.2 se presenta un desglose de la primera fase de gabinete respecto a los diferentes trabajos que deben llevarse a cabo para el correcto sustento del estudio, la cual es modificada desde Lara (2007).

Tabla 3.2: Estudios preliminares para la evaluación de peligro de remociones en masa. Modificado de Lara (2007)

Factor de estudio		Tópicos por considerar	Herramientas
Delimitación área y escala de estudio		<ul style="list-style-type: none"> • Delimitación geográfica • Definición de escala según recomendación de Sernageomin • Descarte de zonas de baja pendiente (<10°) 	<ul style="list-style-type: none"> • Cartografía • Cartas geológicas • Ráster
Factores condicionantes	Antecedentes históricos	<ul style="list-style-type: none"> • Tipos de eventos ocurridos • Distribución espacial • Volumen de material involucrado • Agente gatillante del evento 	<ul style="list-style-type: none"> • Bibliografía • Prensa
	Geología	<ul style="list-style-type: none"> • Roca: Litología y delimitación de unidades, alteración, meteorización y estructuras 	<ul style="list-style-type: none"> • Cartas geológicas • Fotos aéreas • Bibliografía • Ráster
	Geotecnia	<ul style="list-style-type: none"> • Roca: Tipos de estructuras • Suelo: Datos de granulometría, resistencia, permeabilidad 	
	Geomorfología	<ul style="list-style-type: none"> • Tipos de unidades • Topografía, mapa de pendientes • Identificación de escarpes de remoción en masa antiguas • Red de drenaje • Orientación de laderas • Delimitación y superficie de hoya hidrográfica 	
	Hidrología e Hidrogeología	<ul style="list-style-type: none"> • Identificación de cauces principales y secundarios • Datos de caudales, escorrentía, infiltración, posiciones y variaciones del nivel freático 	
	Vegetación	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo, distribución y densidad • Variación estacional 	
	Actividad antrópica	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de suelo • Procesos de urbanización • Identificación de impacto de tipo ingenieril, minero, entre otros. 	

3.3 Segunda fase de gabinete (G2)

3.3.1 Reformulación conceptual de la metodología preliminar

El inicio de la fase G1 da paso al complemento propuesto por este estudio. Este apéndice se engrana a la metodología de Lara (2007) en una primera parte, mediante una reformulación de los factores dentro de las tablas de índice de susceptibilidad recopiladas y descritas en el capítulo 2 de este trabajo.

La modificación conceptual se basa principalmente en la definición de nuevos factores condicionantes globales obtenidos de Muñoz (2013) y por comunicación oral desde Lara (2022), donde se agregan a la metodología factores en base a la respuesta sísmica en zonas urbanas para la evaluación de susceptibilidad de remociones en masa y efecto de trazas antrópicas que aíslan la humedad de las unidades geomorfológicas, respectivamente.

Finalmente, la modificación representa el enfoque antrópico de este trabajo, reorganizando el factor humano dentro de la tabla con una justificación y observación individual de cada factor respecto a las acciones humanas dentro de la cuenca de estudio.

La reformulación conceptual debe incluir la evidencia de carácter regional y local de cada factor para así sustentar los cambios aritméticos posteriores. Estas evidencias deben ser recolectadas principalmente de estudios realizados en las porciones de América del Sur (Cuencas de Argentina y Chile), dentro de la Cordillera de los Andes Centrales.

Localmente, las evidencias utilizadas deben pertenecer a estudios formulados en el piedemonte de la ciudad de Santiago, específicamente en la porción suroriental correspondiente al territorio de la comuna de Las Condes, La Reina, Peñalolén y La Florida.

Los estudios preliminares y la primera fase de terreno aportan también como evidencia de la acción humana, recopilando evidencia dentro de imágenes satelitales y corroborando dichas trazas en el terreno. Cabe destacar que las tablas de reponderación propuestas por este trabajo también se justifican preliminarmente por las evidencias propuestas en la tabla de reformulación conceptual (Tabla 3.3). Ante cualquier confusión, la tabla de reformulación conceptual es la base de este apéndice, ya que incorpora la información destacada dentro de los estudios recopilados y los autores que han estudiado dicho factor en los últimos 20 años, en conjunto a los estudios de terreno de dichas cuencas. Toda la reformulación conceptual de la metodología de Lara (2007) es desglosada en la tabla 3.3, tal y como se muestra a continuación.

Tabla 3.3: Reformulación conceptual de los factores gatillantes a flujos de la metodología de Lara (2007) respecto al factor antrópico.

Factor	Desglose	Modificación respecto a Lara (2007)	Observaciones según área de estudio
Geomorfología	Pendiente de ladera	No se modifica.	En general, se evidencia modificación antrópica de carácter leve a las pendientes de las unidades geomorfológicas que componen a la quebrada.
	Pendiente de canal	No se modifica.	Se evidencia modificación antrópica de carácter fuerte a la pendiente del canal, principalmente en las porciones bajas de la cuenca.
	Encajonamiento del canal	No se modifica.	Se aprecia modificación humana sobre las porciones distales al origen del cauce, principalmente un angostamiento antrópico o cuello de botella en la zona más cercana a la desembocadura (Anexo 1).
	Exposición al sol	No se modifica.	Aislamiento subaéreo producto de trazas humanas tales como: concreto, coberturas de plástico, madera prensada, mallas de tela, entre otras (Anexo 1)
Geología – Geotecnia	Distancia a zona de falla	Nueva característica condicionante asociada al factor geológico.	Zona adyacente a un Sistema de Falla de longitud kilométrica y sismicidad activa (Falla San Ramón, perteneciente al Sistema de falla regional Pocuro).
	Características geológicas - geotécnicas	No se modifica.	Presencia de impacto estratigráfico y alteración geotécnica sobre las unidades de suelo cercanas a la desembocadura de la quebrada, asociado al condominio “Cumbres de la Viña” e infraestructura de contención aluvial rota (Anexo 1).
Clima - Vegetación	Acumulación de nieve	No se modifica.	Regionalmente, alteración de la altura de línea de nieve producto del cambio climático acelerado por el agente humano.
	Cobertura vegetal	No se modifica.	Regionalmente, estudios indican que la cobertura vegetal no favorece ni disminuye la susceptibilidad a remociones en masa. Deforestación leve.
Antrópico	Condición de humedad y saturación	Originalmente dentro del factor geológico-geotécnico.	Efecto regional y local de desertificación producto del cambio climático acelerado por el agente humano. Aislamiento subaéreo de trazas humanas tales como: concreto, coberturas de plástico, madera prensada, deforestación, entre otras. Modificación local del ciclo acuoso (sobreextracción) (Anexo 1).
	Desestabilización artificial de ladera	No se modifica.	Presencia de impacto estratigráfico y alteración de parámetros geotécnicos sobre las unidades cercanas a la desembocadura de la quebrada, principalmente asociado al condominio “Cumbres de la Viña” (Anexo 1).
	Obstrucción del canal de drenaje	No se modifica.	Se aprecian sobre las porciones distales al origen del cauce, principalmente diversas obstrucciones antrópicas de acumulación de sedimento, concreto fracturado, entre otras. Obstrucción por vegetación (Anexo 1).
Antecedentes	Aluviones declarados en la Hoya	No se modifica.	Aluviones prehistóricos (Holoceno – Pleistoceno) descritos y publicados por Folk (2005)

3.3.2 Reponderación de factores condicionantes en flujos definidas en la metodología

La modificación de la ponderación y los puntos que cuantifican a los factores condicionantes considerados en los flujos se basan principalmente en la bibliografía científica geotécnica del Antropoceno (Crutzen y Stoermer, 2000; Smith, 2001; Crutzen, 2002; Zalasiewicz et al., 2008; González de Vallejo et al., 2014) y en las recomendaciones metodológicas propuestas en la bibliografía de susceptibilidad de remociones en masa nacional, las cuales incluyen una perspectiva regional similar (Sepúlveda, 1998; Lara, 2007; Martínez, 2009; Lara y Sepúlveda, 2010; Territorio y Ciudad Consultores, 2013; Ferrando, 2014).

Con el fin de lograr un análisis y selección objetiva de la ponderación final a utilizar por este método, se deben realizar diferentes propuestas numéricas y nuevas reformulaciones para evidenciar las variaciones estadísticas entre estas y, además, cumplir con el objetivo general de evidenciar la subestimación de puntaje y por consecuencia, la subestimación visual en las condiciones reales de las laderas estudiadas y que son representadas dentro de los mapas temáticos de susceptibilidad. Se deberá escoger aquella fórmula que no subestime ni sobreestime las condiciones reales y los mapas de las unidades geomorfológicas definidas en la hoya hidrográfica. Cualquiera de estas propuestas de modificación realizada a la metodología de Lara (2007) deber ser identificada, desglosada y caracterizada con sus respectivas especificaciones (Tabla 3.4), además de ser contrastada con las características de la metodología original.

La tabla 3.5; 3.6 y 3.7 contiene las justificaciones específicas desglosadas de las propuestas aritméticas realizadas por este estudio y descritas en la tabla 3.4.

Con el fin de no desviar las propuestas respecto a la estructura de la formulación de la metodología original, se pueden mantener los rangos o condiciones propuestas originalmente, redistribuyendo solamente los puntajes numéricos y manteniendo los niveles propuestos en Lara y Sepúlveda (2010). Para revisar el sustento bibliográfico de ambas tablas, revisar la tabla 3.3.

En base a los análisis estadísticos de las diferentes distribuciones de susceptibilidad de flujos según las fórmulas propuestas, la tabla de puntajes que sea seleccionada finalmente debe ser ubicada dentro de la conclusión de este trabajo para generar un análisis crítico de los datos numéricos, estadísticos y visuales que entrega dicha reformulación.

Tabla 3.4: Propuestas de reponderación de los factores gatillantes a flujos de la metodología de Lara (2007)

Desglose de factores según Lara (2007)	Ponderación global original (Lara, 2007)	Desglose de factores según este estudio	Ponderación global A (Este estudio)	Ponderación global B (Este estudio)	Ponderación global C (Este estudio)
Pendiente de ladera	35 de 100 puntos (35%)	Pendiente de ladera	35 de 100 puntos (35%)	35 de 100 puntos (35%)	35 de 100 puntos (35%)
Pendiente de canal		Pendiente de canal			
Encajonamiento del canal		Encajonamiento del canal			
Exposición al sol		Exposición al sol			
Características geológicas – geotécnicas	35 de 100 puntos (35%)	Distancia a zona de falla	25 de 100 puntos (25%)	30 de 100 puntos (30%)	35 de 100 puntos (35%)
Condición de humedad y saturación		Características geológicas - geotécnicas			
Cobertura vegetal	10 de 100 puntos (10%)	Cobertura vegetal	10 de 100 puntos (10%)	5 de 100 puntos (10%)	5 de 100 puntos (10%)
Acumulación de nieve		Acumulación de nieve			
Desestabilización artificial de ladera	10 de 100 puntos (10%)	Condición de humedad y saturación	20 de 100 puntos (20%)	25 de 100 puntos (25%)	20 de 100 puntos (20%)
Obstrucción del canal de drenaje		Desestabilización artificial de ladera			
		Obstrucción del canal de drenaje			
Aluviones declarados en la Hoya	10 de 100 puntos (10%)	Aluviones declarados en la Hoya	10 de 100 puntos (10%)	5 de 100 puntos (10%)	5 de 100 puntos (10%)

Tabla 3.5: Justificación desglosada de reponderación específica de los factores gatillantes a flujos de la metodología de Lara (2007).

Desglose de factores según este estudio	Justificación específica A (Este estudio)	Puntaje específico A (Este estudio)	Justificación específica B (Este estudio)	Puntaje específico B (Este estudio)	Justificación específica C (Este estudio)	Puntaje específico C (Este estudio)
Pendiente de ladera	Esta ponderación no se modifica respecto a la metodología original.	3 – 6 – 9 – 11 – 13 – 15	Esta ponderación no se modifica respecto a la metodología original.	3 – 6 – 9 – 11 – 13 – 15	Esta ponderación no se modifica respecto a la metodología original.	3 – 6 – 9 – 11 – 13 – 15
Pendiente de canal		1 – 5 – 10		1 – 5 – 10		1 – 5 – 10
Encajonamiento del canal		1 – 4 – 7		1 – 4 – 7		1 – 4 – 7
Exposición al sol		0 – 2 – 3		0 – 2 – 3		0 – 2 – 3
Distancia a zona de falla	Según distancia de la unidad geomorfológica respecto a la zona de ruptura de la Falla San Ramón.	0 puntos (2000 m) 2 puntos (1500 m) 3 puntos (1000 m) 4 puntos (500 m) 5 puntos (< 500 m)	Según distancia de la unidad geomorfológica respecto a la zona de ruptura de la Falla San Ramón.	0 puntos (2000 m) 2 puntos (1500 m) 3 puntos (1000 m) 4 puntos (500 m) 5 puntos (< 500 m)	Según distancia de la unidad geomorfológica respecto a la zona de ruptura de la Falla San Ramón. Se duplican los rangos para un escenario de alta sismicidad.	0 puntos (2000 m) 4 puntos (1500 m) 6 puntos (1000 m) 8 puntos (500 m) 10 puntos (< 500 m)
Características geológicas - geotécnicas	Se reduce el tope máximo a 20 puntos para incorporar el factor de falla. Se reduce el factor de forma global de 35 a 25 puntos producto de la predominancia del factor humano en zonas bajas de la hoya.	3 – 8 – 13 – 15 – 20	Esta ponderación no se modifica respecto a la metodología original.	3 – 8 – 13 – 18 – 25	Esta ponderación no se modifica respecto a la metodología original. De forma general, el factor geológico es el núcleo de la ponderación de esta fórmula.	3 – 8 – 13 – 18 – 25
Acumulación de nieve	Esta ponderación no se modifica respecto a la metodología original.	0 – 1 – 2 – 5	Se minimiza el tope producto de las bajas altura del piedemonte.	0 – 1 – 2 – 3	Esta ponderación no se modifica respecto a la metodología original.	0 – 1 – 2 – 5
Cobertura vegetal		0 – 3 -- 5	Se minimiza el tope producto de la baja influencia de la cobertura vegetal.	0 – 1 -- 2	Se utiliza el puntaje de este factor para equilibrar el factor antrópico respecto al geológico.	0

Tabla 3.6: Justificación desglosada de reponderación específica de los factores gatillantes a flujos de la metodología de Lara (2007) (continuación).

Desglose de factores según este estudio	Justificación específica A (Este estudio)	Puntaje específico A (Este estudio)	Justificación específica B (Este estudio)	Puntaje específico B (Este estudio)	Justificación específica C (Este estudio)	Puntaje específico C (Este estudio)
Condición de humedad y saturación	Esta ponderación no se modifica respecto a la metodología original. Este factor se incluye dentro del agente antrópico producto de aislamiento de unidades geomorfológicas (Anexo 1).	2 – 3 – 7 – 10	Esta ponderación no se modifica respecto a la metodología original. Este factor se incluye dentro del agente antrópico producto de aislamiento de unidades geomorfológicas (Anexo 1).	2 – 3 – 7 – 10	Esta ponderación no se modifica respecto a la metodología original. Este factor se incluye dentro del agente antrópico producto de aislamiento de unidades geomorfológicas (Anexo 1).	2 – 3 – 7 – 10
Desestabilización artificial de ladera	Esta ponderación no se modifica respecto a la metodología original.	0 – 3 – 5	Se duplican los rangos producto de la predominancia de unidades geomorfológicas desestabilizadas artificialmente en las zonas bajas de la hoya	0 – 6 – 10	Esta ponderación no se modifica respecto a la metodología original.	0 – 3 – 5
Obstrucción del canal de drenaje	Esta ponderación no se modifica respecto a la metodología original. Se aumento de forma global el factor antrópico al nivel del factor geotécnico-geológico.	2 – 4 – 5	Esta ponderación no se modifica respecto a la metodología original. Se aumento de forma global el factor antrópico al nivel del factor geotécnico-geológico	2 – 4 – 5	Esta ponderación no se modifica respecto a la metodología original. Se aumento de forma global el factor antrópico al nivel del factor geotécnico-geológico	2 – 4 – 5
Aluviones declarados en la Hoya	Esta ponderación no se modifica respecto a la metodología original.	1 – 4 – 7 -- 10	Se dividen los rangos del factor producto de la inactividad de la cuenca de estudio según Folk (2005).	0 – 3 – 4 -- 5	Se dividen los rangos del factor producto de la inactividad de la cuenca de estudio según Folk (2005).	0 – 3 – 4 -- 5

3.4 Primera etapa de terreno (T1)

Esta etapa está enfocada en la realización de un mapa geológico y geomorfológico a la escala definida, que reúna la información recolectada en terreno (mapeo geológico básico) y en la revisión de antecedentes. La confección de los mapas debe estar en línea a la caracterización geológica, geomorfológica y geotécnica de suelo presentes en la zona de estudio (Lara, 2007).

3.4.1 Mapeo Geológico Básico

El mapeo de la geología consta de la delimitación espacial de las unidades de suelo y roca cuyos afloramiento u horizontes sean identificables en la zona. Así, la geología de roca incluye la descripción litológica de las unidades y su distribución espacial, la geología estructural (presencia de fallas, pliegues, estratificación) y la identificación por sectores de los sets estructurales predominantes, la descripción de zonas y grado de meteorización y de alteración de la roca (Lara, 2007). En tanto, la geología de suelo debe incluir su descripción visual, que permite identificar entre suelos transportados y residuales, la identificación de los tipos de depósitos, la delimitación de estos depósitos y espesores asociados. En particular, la diferenciación de las unidades de suelo residual y de suelo transportado permitirá identificar la posible presencia de estructuras conservadas que al presentarse como planos de debilidad podrían influir notoriamente en la estabilidad de los depósitos (Lara, 2007). Este mapeo de todas formas se enfocará principalmente en la utilización de datos de suelo más que de roca, producto de que la génesis de los flujos y los cálculos de susceptibilidad posteriores son intrínsecamente ligados a unidades de suelo.

3.4.2 Mapeo geomorfológico

Dentro de los factores condicionantes, los rasgos más relevantes a considerar corresponden a las pendientes de laderas en el área de estudio, sus alturas, exposición al sol y geometrías asociadas, por lo que la confección del mapa geomorfológico es de suma relevancia. Dentro de esta fase, se sugiere la utilización de imágenes con resoluciones altas según escala de estudio. En este caso particular, el DEM a utilizar corresponde al modelo de elevación del sector oriente de Santiago, resolución 12,5 m.

La geomorfología incluye también la identificación, delimitación y descripción de unidades geomorfológicas como terrazas, abanicos aluviales, unidades glaciares, depósitos de remociones

antiguas, escarpes de falla, y escarpes de remoción en masa antiguos y recientes, además de la caracterización del drenaje del área involucrada en el estudio y el encajonamiento de los cauces y quebradas. Este estudio utiliza la simbología de Gutiérrez (2008) y la definición de geomorfologías de Jennings (1977), estudio que presenta un mapa conceptual de los diferentes grupos geomorfológicos en base a la génesis, donde se definen además geomorfologías antrópicas, como se aprecia en la figura 3.2.

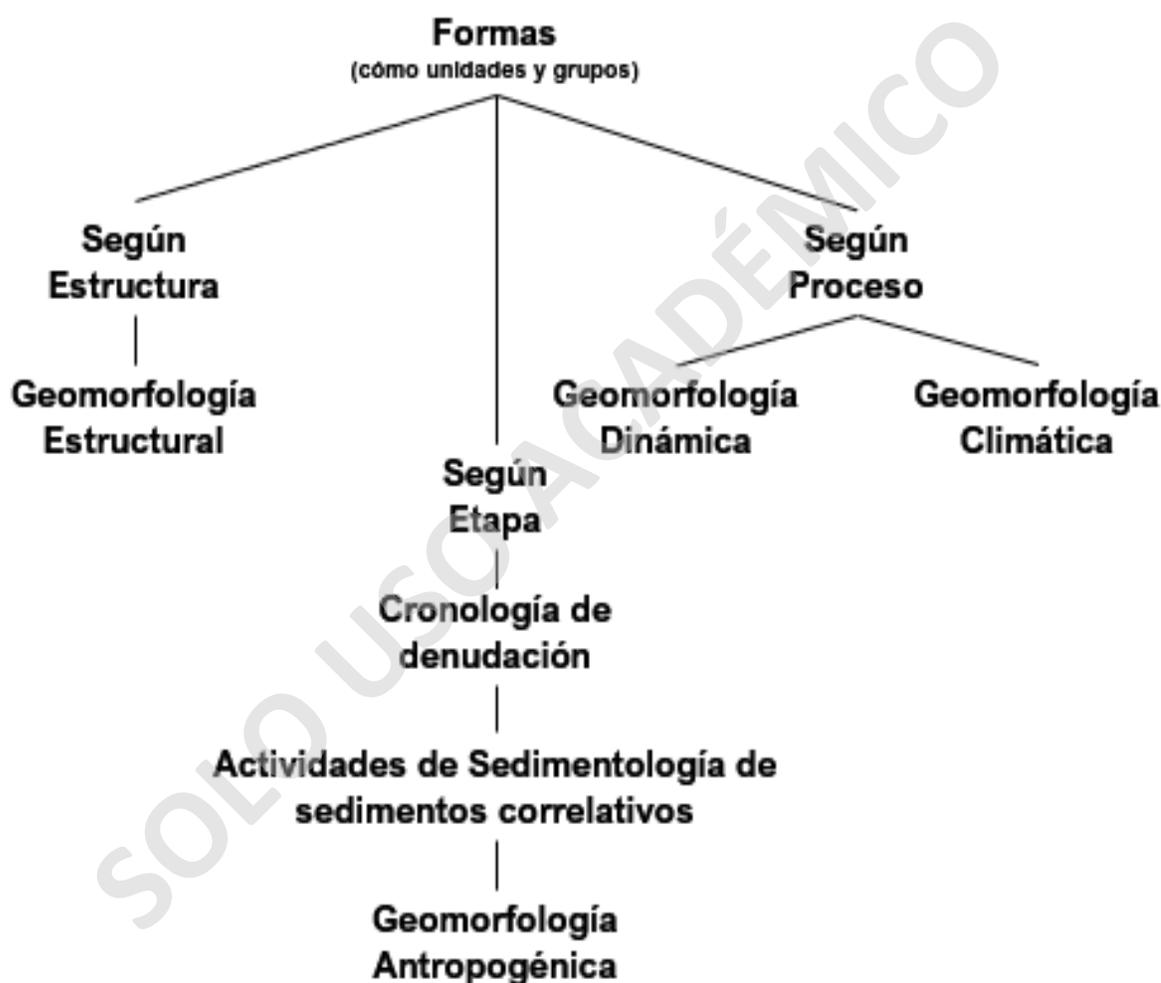


Figura 3.2: Esquema general de la separación geomorfológica utilizada en este estudio. Extraído y modificado de Jennings (1977).

3.4.3 Caracterización de trazas antrópicas preliminares

La fase de terreno puede finalizar con la definición de escalas y geolocalización de los límites de las trazas antrópicas de mayor tamaño dentro de la estratigrafía de la cuenca, los cuales deben ser

descritos preliminarmente en el terreno para posteriormente anexar los análisis, caracterización y definición de las trazas. Los estudios en el hemisferio norte para la definición del Antropoceno se basan en la búsqueda de isótopos y partículas dentro de columnas estratigráficas con procesos de depositación activos como se aprecia en la figura 3.3. Este estudio si bien no colabora con la obtención de trazas humanas a microescala, sí colabora con la geolocalización y descripción respecto a la afectación que genera este impacto dentro de la geomorfología, geología y geotecnia.

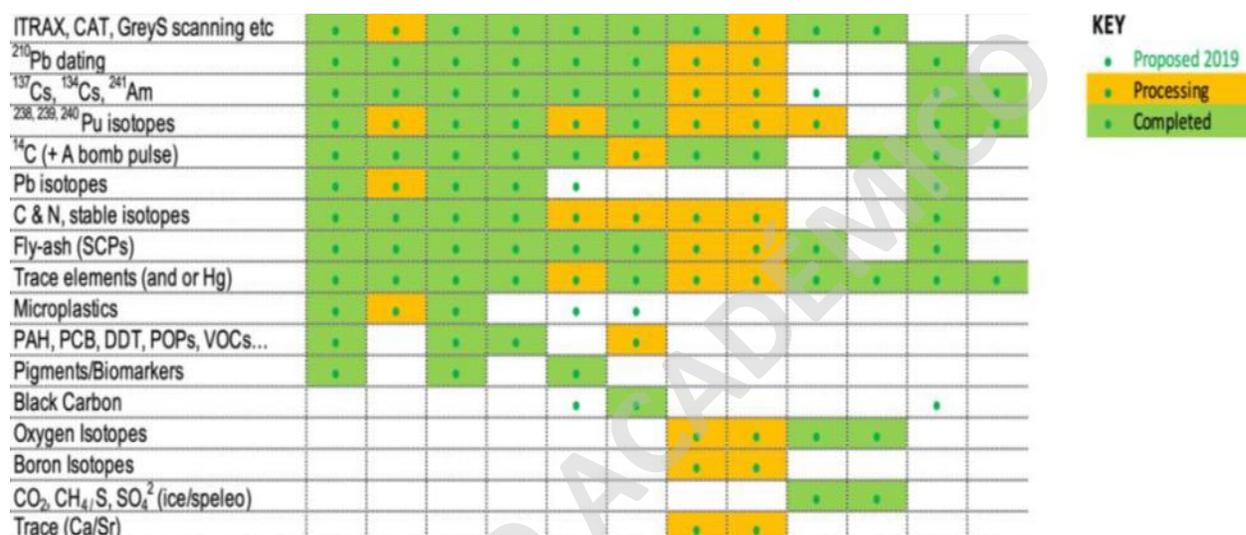


Figura 3.3: Matriz de análisis de trazas antrópicas propuestas por el Anthropocene Working Group (AWG, 2022) para el avance de la definición del Antropoceno. Este estudio se centra en el mapeo de trazas como volúmenes de suelo y roca externos, figuras de concreto, localización de basurales e intervenciones humanas a gran escala, como construcción de condominios, presas de agua, infraestructura de contención para fenómenos naturales, entre otras.

3.5 Tercera fase de gabinete (G3)

En esta etapa del trabajo, que se desarrolla luego de haber realizado la primera parte del trabajo de terreno y la recopilación de antecedentes geológicos, se debe realizar una división preliminar de la zona de estudio en unidades geomorfológicas o unidades de ladera, que actúan como geomorfología básica para la construcción y definición de una hoya hidrográfica.

El resultado de esta fase es un mapa de susceptibilidad preliminar para cada uno de los tipos de remociones en masa estudiadas, con un Índice de Susceptibilidad (IS) que varía entre 0% y 100%.

Al tratarse de un trabajo de mayor detalle que el de Sepúlveda (1998); Lara (2007); Ceballos (2016) y Celis (2018), se recomienda la reducción de escala de mapeo para una mejor resolución de data.

3.5.1 Definición de unidades geomorfológicas preliminares

Esta etapa consiste en dividir la zona de estudio en diferentes unidades según rasgos geomorfológicos y geológicos similares, tales como: la orientación de la ladera (aspecto); la pendiente; litología y tipos de depósitos (Sepúlveda, 1998; Lara, 2007). Desde este punto, quiebres de pendiente muy fuerte y cambios bruscos en el aspecto son factores para definir una nueva unidad, de esta manera cada una de ellas quedará definida por un aspecto y pendiente (Lara, 2007). Si bien la cantidad de unidades a definir dependen del tamaño del área de estudio, no se recomienda definir más de unas 150 unidades. Estas unidades no pueden ser las finales producto del error procedente de las imágenes y modelos digitales de elevación que entregan ciertos datos respecto a las características geomorfológicas.

3.6 Segunda etapa de terreno (T2)

Al haber realizado un mapeo de unidades geomorfológicas preliminares, este mapa debe proceder a una corroboración de los límites propuestos con una segunda fase de terreno. Sin embargo, esta etapa consta de cuatro actividades principales más: Corroboración de datos geomorfológicos preliminares tales como orientación de la ladera (aspecto) y la pendiente; definición in situ de los límites reales de las unidades propuestas; caracterización geotécnica y de vegetación de las unidades finales; y finalmente el muestreo de material y mapeo estructural en detalle en laderas que lo requieran, por ejemplo, aquéllas que claramente representan zonas de alta inestabilidad y donde exista una gran cantidad de sets estructurales que no se han podido definir de manera general anteriormente. Cabe notar que de estas etapas se pueden obtener parámetros geotécnicos los cuales se pueden definir como “representativos” en ciertas unidades. Para la correcta utilización de estos datos, la cuenca deberá ser sectorizada en dominios diferentes, separados por alguna característica geomorfológica predominante para establecer una ladera promedio de dicho dominio, la cual pueda ser comparada respecto a las unidades definidas en otras porciones.

3.6.1 Definición final de unidades geomorfológicas de la cuenca

Posterior al dibujo de software y mapeo preliminar de unidades, se puede proceder a la definición de las unidades de ladera que serán utilizadas como la separación geomorfológica final de la zona de estudio, modificadas evidenciando el error procedente de los modelos digitales de elevación, aumentando o disminuyendo el número de unidades definidas.

3.6.2 Caracterización geotécnica de detalle

En esta etapa, la geotecnia debe ser descrita de manera básica, en cada depósito y afloramiento que sea posible. Esta caracterización (ubicada en el Anexo 2) debe ser reforzada por generación de líneas de detalle en unidades que sean catalogadas como críticas para la generación de remociones en masa de tipo flujos, para que la reformulación metodológica tenga un sustento cuantificable.

3.6.3 Caracterización hidrológica e hidrogeológica

El estudio hidrológico en terreno se debe centrar principalmente en la identificación de los cauces y quebradas existentes. Lara (2007) también incluye la determinación de cambios bruscos de pendientes de ejes hidráulicos que influirían en la energía de eventuales flujos. Las descripciones hidrogeológicas deben centrarse en la ubicación de afloramientos de agua que permitan obtener referencias en cuanto a la posición en profundidad del nivel freático y sus variaciones.

La información obtenida deberá ser expuesta en un mapa junto con la información geológica y geotécnica. En caso de tener mucha información (lo que en la mayoría de los casos no sucede) se podrá realizar un mapa exclusivamente hidrológico-hidrogeológico (Lara, 2007).

Una de las modificaciones respecto a la tarea de descripción hidrogeológica desarrollada de Lara (2007) es respecto a los ensayos geotécnicos, como por ejemplo las pruebas de humedad en ladera. Metodológicamente, la cuantificación de este parámetro debe ser obtenido mediante un análisis de laboratorio profundo de muestras recopiladas en diferentes porciones de la cuenca, respectivos a aquellas laderas que sean las más representativas dentro de la ubicación de la hoya.

Estas pruebas de laboratorio al muestreo de roca y suelo son necesarias para obtener la capacidad de saturación, almacenaje de agua y variaciones estacionales de humedad. Dentro de esta metodología, el factor de humedad dentro de las laderas se puede caracterizar y ponderar como una unidad no favorable (3 puntos), favorable o muy favorable a desestabilizarse por saturación de agua. Una alta saturación y almacenaje son favorables para la generación de flujos saturación de agua, permeabilidad, entre otras características. Si es que la cuenca seleccionada no presenta ensayos de humedad vigentes a la fecha de realización de las descripciones, Lara (2007) sugiere relevar el puntaje y definir la zona como “Sin antecedentes”, minimizando el factor a sólo 2 puntos. Debido a la diferencia de envergadura profesional entre ambos trabajos, este estudio (en base a la bibliografía propuesta por Cuanalo et al., 2011) sugiere realizar una jerarquización del factor de humedad utilizando e integrando los diferentes factores visuales que son atingentes a la descripción

de laderas para definir su condición de humedad, y así, utilizar de la ponderación total sin subestimar la susceptibilidad de la hoya, incluyendo el cálculo de porcentaje de humedad de muestra (Instituto de Construcción y Gerencia del Perú, 2016). Los factores que se sugieren integrar respecto a la humedad son la exposición solar de ladera y la presencia de impacto antrópico. Para ejemplificar la jerarquía de humedad dentro de las laderas, se realizó la tabla 3.7 con la descripción de todas las combinaciones de factores integrados y su afectación dentro de los puntajes.

Tabla 3.7: Descripción de combinaciones de factores de condicionalidad integrados al factor de humedad de ladera.

Exposición solar de ladera	Condición de humedad de ladera	Tipo de intervención antrópica	Condición final y Puntaje	Valorización geotécnica final
Norte	No saturada	No presenta	No favorable (3 puntos)	Depende de la descripción in situ
Norte	No saturada	Exposición estratigráfica (Intervención geomorfológica)	No favorable (3 puntos)	Pierde calidad (moderada) por evaporación y permeabilidad diferencial.
Norte	No saturada	Cobertura estratigráfica (Materiales no naturales y basurales)	No favorable (3 puntos)	Pierde calidad (leve) por evaporación y tensión diferencial.
Parcial	No saturada	No presenta	No favorable (3 puntos)	Depende de la descripción in situ
Parcial	No saturada	Exposición estratigráfica (Intervención geomorfológica)	No favorable (3 puntos)	Pierde calidad (moderada) por evaporación y permeabilidad diferencial.
Parcial	No saturada	Cobertura estratigráfica (Materiales no naturales y basurales)	Favorable (7 puntos)	Pierde calidad (leve) por evaporación y tensión diferencial.
Sur	Posiblemente saturada	No presenta	Favorable (7 puntos)	Depende de la descripción in situ
Sur	Posiblemente saturada	Exposición estratigráfica (Intervención geomorfológica)	No Favorable (3 puntos)	Pierde calidad (moderada) por evaporación y permeabilidad diferencial.
Sur	Posiblemente saturada	Cobertura estratigráfica (Materiales no naturales y basurales)	Favorable (7 puntos)	Se mantiene el puntaje para no sobrestimar por falta de datos.

Las reglas de jerarquización propuestas siguen la siguiente correlación: Primero se define y se pondera la exposición solar de la ladera producto de que la humedad varía completamente según este parámetro, es decir, una ladera en el hemisferio sur que apunte hacia el norte no tendrá la misma condición de humedad que una ladera que apunte hacia el sur. En este método, una ladera con exposición norte y exposición parcial deben ser categorizadas como laderas no saturadas, mientras que una ladera con exposición sur debe ponderar un IS mayor por la condición de saturación de humedad provocado por la sombra, vegetación y coberturas antrópicas. Finalmente, tras el filtro, la humedad debe ser catalogada como no favorable o favorable según el método de Lara (2007). No se utiliza la condición de muy favorable para no sobrestimar los cálculos.

En base a Cuanalo et al. (2011), también se puede definir finalmente que la descripción y jerarquización de humedad en una ladera debe ser incorporado al momento de definir la condición geotécnica, por la alteración de la plasticidad, cohesión y tensión intersticial, las cuales son descritas en la tabla anteriormente mencionada.

3.6.4 Caracterización de vegetación

La fase de terreno consta también de la identificación de la vegetación existente en la zona de estudio. La descripción de sus características debe enfocarse en el tipo de vegetación presente (diferenciando entre vegas, arbustos, árboles y praderas), cómo se encuentra distribuida, su densidad en términos relativos, alturas promedio y a qué tipo de depósito se encuentra asociada (Lara, 2007). El factor de vegetación ha sido puesto en duda principalmente porque se definió originalmente como un agente que previene o ralentiza los flujos de detritos (Selby, 1993). Existe evidencia geológica de flujos, donde se afirma que el factor de vegetación no es influyente en la génesis de un aluvión (Eventos de la Región austral de Aysén). De todas formas, este estudio lleva a cabo esta descripción producto de que procesos como la deforestación también pueden ser trazables como una bioturbación humana, ya que puede estar asociado a un impacto estratigráfico.

3.6.5 Caracterización final e individual de actividad antrópica

Dentro de la etapa de terreno, la descripción y geolocalización de las trazas antrópicas de mediana y pequeña escala es fundamental para el análisis de dependencia de factores que dan génesis a flujos de detritos. Dentro del campo, es imperante realizar una categorización descripción y fotografiado de las diferentes trazas humanas que se encuentren dentro de la estratigrafía, para

luego trazarlas vía GPS y ser expuestas en los mapas temáticos de susceptibilidad. La caracterización de las trazas será descrita de forma símil a la paleontología sistemática con un correcto etiquetado de la muestra, y estarán agrupadas dentro del Anexo 1.

3.6.6 Muestreo de material

La selección de las zonas de muestreo debe satisfacer la condición de que exista material suficiente para ser recolectado dependiendo de los ensayos de laboratorio (Anexo 3). Mientras más zonas sean muestreadas mayor cantidad de ensayos será posible realizar y por lo tanto se obtendrá un mejor catastro de las propiedades de los materiales que se encuentran en el área (Lara, 2007).

La determinación de la densidad puede realizarse en terreno mediante el método del cono de arena. Este mismo material podrá ser utilizado para determinar la humedad del suelo en terreno mediante diferencias de peso. Si bien la cantidad de material a extraer depende de los ensayos a realizar, en general es suficiente 10 a 15 kg si se trata de suelo fino (Lara, 2007).

3.6.7 Ensayos de humedad y granulometría simplificados

El análisis de laboratorio dentro de las metodologías de susceptibilidad se enfoca principalmente en la obtención de parámetros geotécnicos y geomecánicos en suelo de manera cuantitativa. Con el muestreo de suelo se pretende obtener aquellos parámetros que caracterizan a los factores condicionantes predominantes definidos en la literatura.

Estos datos deben ser incorporados al momento de comparar unidades geomorfológicas críticas respecto de unidades en buena condición, para determinar una condición de estabilidad más crítica.

Para el caso de los parámetros geotécnicos se realizan ensayos en suelo de granulometría de los finos y porcentaje de la humedad de la muestra obtenida de la ladera, utilizando balanzas, pipetas y hornillos (Instituto de Construcción y Gerencia del Perú, 2016; Lara, 2007). Se puede realizar, además, sin ser estrictamente necesario, la determinación de permeabilidad, de peso específico y de densidad del suelo (anexas al método del cono de arena) mediante ensayos simples que son descritos en el Anexo 3.

La granulometría busca la obtención de la clasificación de la fracción gruesa del suelo y la distribución granulométrica de las partículas del suelo en base a una serie de tamices normalizados por la norma ASTM4 D421-58 y ASTM D422-63 o (o su equivalente BS5).

Los datos obtenidos respecto a la humedad y cohesión son muy relevantes, ya que estos parámetros son expuestos como el sustento de los factores geológicos y geotécnicos de las laderas. Los análisis de humedad dentro del laboratorio deben ser contrastados con datos estadísticos del carácter de humedad en la zona, con la finalidad tanto de definir un consenso del parámetro de humedad dentro de las laderas como también para evidenciar las modificaciones generadas por el asentamiento humano en el sector.

Los parámetros de cohesión y estabilidad de granos obtenidos dentro del laboratorio también deben ser contrastados principalmente respecto a la caracterización bibliográfica de los diferentes tipos de litologías y depósitos sedimentarios que se encuentrasen presentes en la cuenca y que formen parte de la construcción geomorfológica.

Todos los resultados geotécnicos obtenidos a través ensayos de humedad y granulometría simplificados son incorporados al anexo 3 de este estudio.

3.7 Cuarta fase de gabinete (G4)

3.7.1 Evaluación de susceptibilidad de flujos

Incluyendo ambas fases de terreno realizadas previamente a este gabinete y habiendo cartografiado las unidades geomorfológicas que componen a la hoya hidrográfica, se puede evaluar por primera vez la susceptibilidad de génesis de remociones en masa de tipo flujo mediante el cálculo de un Índice de Susceptibilidad. Este índice se calcula para cada unidad definida y se basa en la suma de los puntajes ponderados para cada uno de los factores condicionantes de remociones en masa (Irigaray y Chacón, 1996; Sepúlveda, 1998). De esta manera, cada unidad tendrá un IS asociado a flujos de manera independiente, en una escala de 0 a 100 puntos.

Los valores propuestos para el cálculo del IS se basan en la metodología elaborada por Lara (2007), Específicamente, el valor crítico para el Índice de Susceptibilidad, $IS = 50$, se ha establecido en base a los fundamentos propuestos en esta metodología original, mediante la calibración con las remociones observadas en la Quebrada San Ramón.

Dentro de esta metodología, los factores condicionantes de geología, geotecnia y geomorfología son considerados como factores primarios en la susceptibilidad, y las ponderaciones son tales que una sumatoria cercana a 50 entre estos parámetros es suficiente para definir una unidad geomorfológica susceptible a una remoción.

Las unidades con $IS > 50$ (valor crítico) se considerarán como susceptibles y se seleccionarán para análisis y contrastes específicos respecto a la identificación de trazas antrópicas en el sector.

Existen métodos alternativos para la evaluación de la susceptibilidad de remociones, como métodos estadísticos de regresión o modelamiento probabilístico de movimientos y caídas, para aquellas áreas donde existe un número importante de remociones en masa y son relativamente periódicas. Estos modelos dependen mucho de la resolución y factor de escala del lugar donde se aplique.

La siguiente fase del apéndice corresponde a la evaluación y análisis de susceptibilidad de remociones en masa tipo aluvión utilizando la metodología heurística-jerárquica de Lara (2007), pero con las nuevas fórmulas de susceptibilidad a remociones en masa presentes en este capítulo. Con toda la evidencia y sustento tanto bibliográfico como de datos numéricos, se puede calcular una la reevaluación de susceptibilidad de flujos con base en la metodología propuesta por Sepúlveda y modificada por Lara (2007) dentro de la quebrada de estudio, pero con la tabla de factores condicionantes reformulados y reponderados, generando así la variación en el cálculo del Índice de Susceptibilidad original de la cuenca. La caracterización y ponderación de las unidades geomorfológicas será recopilada también en el anexo 1, al igual que los puntajes originales.

3.7.2 Descripción estadística

Dentro de los análisis estadísticos, este gabinete comprende de la producción de gráficos de dispersión, tipo boxplot e histogramas para la correlación de índices de susceptibilidad de unidades geomorfológicas entre ambas metodologías. Evaluando los coeficientes de correlación se pueden obtener evidencias claras de similitudes y diferencias estadísticas entre las propuestas de formulación. Además, se debe realizar estadística básica entre los 2 sets de datos obtenidos de ambas metodologías, tales como: Desviación estándar; Error típico; coeficiente de variación para el contraste numérico de índices de susceptibilidad provenientes de otros mapas temáticos que hayan utilizado la metodología sin reformular, entre otros.

3.8 Quinta fase de gabinete (G5)

3.8.1 Validación de mapas de susceptibilidad

Dada la reevaluación y posterior mapeo de susceptibilidad de las unidades geomorfológicas, estos deben ser validados en base a análisis numéricos de los diferentes cálculos respectivos a las fórmulas de IS propuestas y así, poder escoger una conceptualización representativa.

Una forma de realizar la validación del mapa de susceptibilidad de flujos de detritos es a través de un catastro de puntos o zonas activadas durante eventos históricos. Para ello, se debe cruzar este catastro con el mapa final de susceptibilidad y analizar la distribución de éste en los distintos rangos de susceptibilidad: alta, media y baja (Muñoz, 2018)

Muñoz (2018) propone una metodología para la validación de mapas de susceptibilidad de flujos de detritos para la evaluación de amenaza de flujos utilizando análisis jerárquico de procesos y sistemas de georreferencia.

En caso de tener un catastro de puntos, la distribución se analiza por densidad numérica, mientras que para uno de polígonos por densidad de área. En cualquiera de los dos tipos, para validar un mapa de susceptibilidad de flujos de detritos se debe cumplir la siguiente distribución:

$2 \times n$ Unidades de Susceptibilidad alta $\geq 3 \times n$ Unidades de Susceptibilidad media $\geq 12 \times n$ Unidades de Susceptibilidad baja, donde S_{alta} , S_{media} y S_{baja} , representan al número de activaciones en zonas de alta, media y baja susceptibilidad, respectivamente. De esta forma, se obtienen los campos en los cuales un mapa es validado (Muñoz, 2018). Cabe destacar que esta validación se basa en Guinau et al. (2007), en el cual se muestra gráficamente el porcentaje acumulado de corte, que equivale al catastro, versus el índice de susceptibilidad de corte del terreno (TFSI), que es equivalente al mapa de susceptibilidad.

La validación propuesta por Muñoz (2018) se presenta en la figura 3.4, donde se pueden visualizar los diferentes rangos propuestos respecto al porcentaje de unidades geomorfológicas establecido según la agrupación de condición de susceptibilidad calculada previamente y su estadística general. Se pueden realizar hipótesis preliminares respecto a la validez de los mapas de peligro generado mediante las diferentes susceptibilidades calculas por área, pero este método en particular comprende la validación desde los diferentes porcentajes de frecuencia acumulada respecto a la susceptibilidad dentro de las unidades geomorfológicas, es decir, el valor que valida a un mapa finalmente es la concentración de unidades geomorfológicas con índice de susceptibilidad similar.

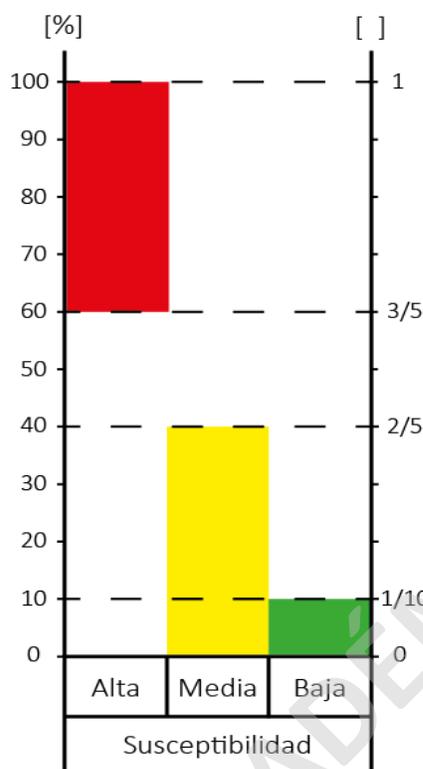


Figura 3.4: Campos de validación de un mapa de susceptibilidad de flujos de detritos a partir de un catastro de activación. Extraído de Muñoz (2018).

De la figura 3.4 se desprende que la distribución de densidad del catastro para zonas de baja, media y alta susceptibilidad de flujos de detritos, varían en los rangos 0-10%, 0-40% y 60-100%, respectivamente. Por ejemplo, en caso de tener un catastro con puntos de activación, donde el 65, 30 y 5% de los puntos, queden dentro de zonas de alta, media y baja susceptibilidad respectivamente, el mapa final es válido (Muñoz, 2018).

3.9 Sexta fase de gabinete (G6)

3.9.1 Análisis visual de unidades geomorfológicas críticas (IS>50) e impacto humano real

El concepto de unidad crítica en este trabajo se centra en aquellas laderas cuyos factores condicionantes hayan sido modificados y que ya no sean los naturales o la representación del promedio. Añadiendo a lo anterior, las laderas con descripciones geotécnicas que indiquen una mala calidad (como baja cohesión, baja plasticidad, argilización, etc.) también fueron consideradas. Como se ha mencionado previamente, este subtítulo del estudio contrasta aquellas unidades “naturales” que no presentan ninguna intervención antrópica (directa o indirecta), respecto a

aquellas “unidades críticas” que presenten un impacto geomorfológico y/o geotécnico y que evidencien condiciones de alta meteorización, baja estabilización, poca cohesión, es decir, que muestren claras tendencias a ceder ante un evento.

Lara (2007) y la revisión de expertos en ese estudio define que, al momento de describir una unidad geomorfológica, se puede inferir (gracias a la expertíz geológica y la habilidad de diferenciación de las heterogeneidades) que las condiciones de una ladera serán similares o iguales respecto a las unidades adyacentes. Esto en otras palabras significa que existirán eventualmente tendencias descriptivas bastante similares dentro de las laderas, por lo cual existe una “unidad geomorfológica promedio” o “unidad geomorfológica con condiciones naturales y estables” dentro de cada quebrada. Esta “unidad promedio” esta intrínsecamente ligada a la descripción más repetida y puntaje promedio de los factores condicionantes que existe en cada porción de la hoya, por lo que cada zona tendrá una unidad que represente a cada sector específico.

Para la rigurosidad del estudio, las laderas que sean consideradas “naturales” y válidas para el contraste serán aquellas que mantengan la tendencia numérica de la dinámica de laderas en el sector, es decir, una ladera natural será aquella cuyo puntaje de IS sea muy similar o igual a la media de las laderas adyacentes a aquellas laderas que no presentan modificaciones en los factores condicionantes producto del agente humano.

3.9.2 Análisis estadístico y visual respecto a diferencias en los cálculos de IS propuestos

Como trabajo final de esta metodología, todos los productos geocientíficos generados por el método deben proceder a un análisis estadístico exhaustivo respecto a la distribución realizada por cada cálculo involucrado en las formulación. Estos parámetros pueden indicar mediante la morfología y dispersión de los datos rangos de error y de amplitud respecto a regresiones lineales para definir de mejor manera las características de sub y sobrestimación asociadas a las diferentes metodologías y ordenamiento de factores. El cálculo de IS debe ser combinado con la trazabilidad de las diferentes bioturbaciones humanas en la hoya y su impacto en la geomorfología y Geotecnia, además de proponer nuevas visualizaciones de los mapeos para enfocar la simbología del factor humano, generando mejores evidencias para la interpretación de forma geológica respecto al peligro y riesgo asociado. Esta fase concluye con la elaboración de recomendaciones en base al análisis crítico de estos resultados, proponiendo sugerencias y críticas objetivas al método utilizado.

4 Antecedentes del área de estudio

4.1 Marco Geomorfológico

4.1.1 Geomorfoloía regional

Dentro de los límites latitudinales del sector de Santiago se reconocen cinco unidades morfoestructurales principales, las cuales presentan una orientación elongada en el eje N-S (variando a SO - NE) y son las estructuras características de la porción de Chile Central (Rauld, 2002; Fock et al., 2006). Las unidades morfoestructurales de Chile Central, de oeste a este corresponden a: Fosa Oceánica del Pacífico; Plataforma Continental de la Costa; Cordillera de la Costa, Depresión Intermedia y la Cordillera Principal, tal y como se observa en la figura 4.1.

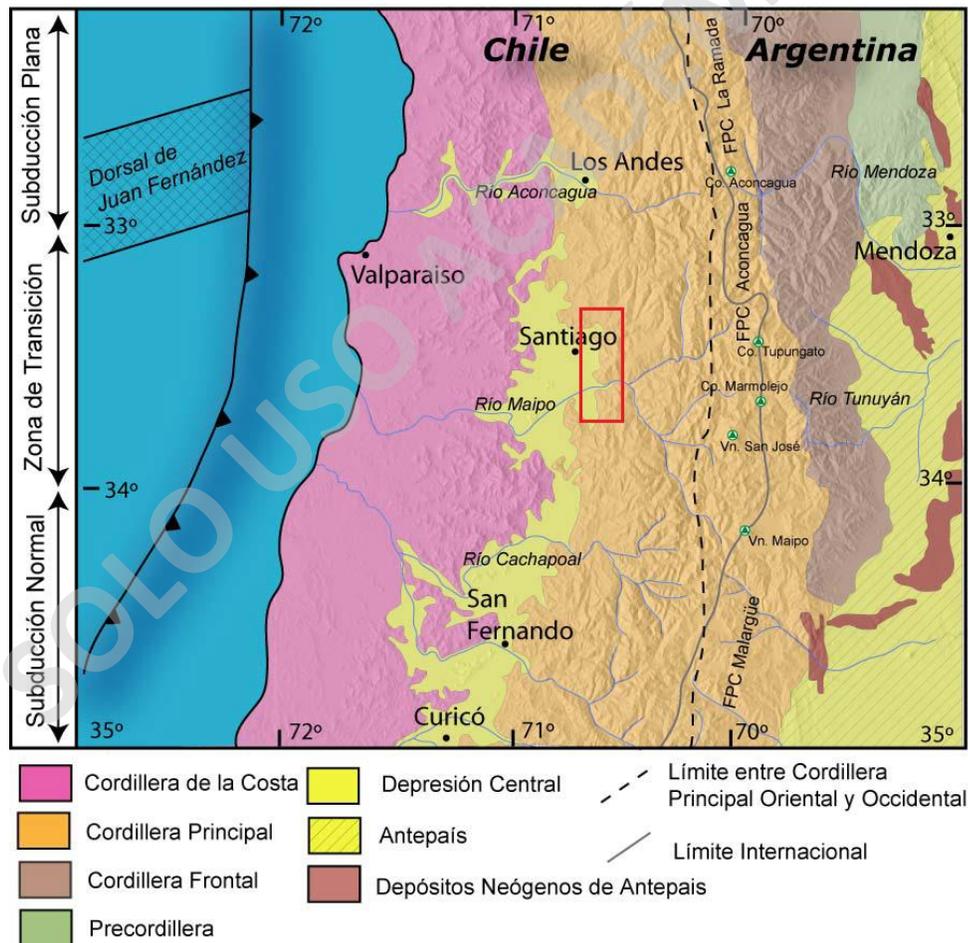


Figura 4.1: Geomorfoloías estructurales de Chile Central, en rojo el polígono de estudio regional. Mapa original de Fock et al. (2006), imagen modificada y extraída de Celis (2018).

La Cordillera Principal puede subdividirse en diferentes unidades a lo largo del Continente Americano (Comeau, 2015), donde la unidad andina perimetral a la ciudad de Santiago corresponde a los Andes Occidentales. Esta estructura se puede subdividir respecto a los cambios de pendiente que conforman el frente, específicamente en figuras estructurales de grandes columnas sedimentarias estratificadas y el denominado Piedemonte de los Andes.

Esta morfología del frente, entre la Depresión Intermedia y la Cordillera Principal, está controlada por la zona de cizalle regional de la Falla Pucuro, la cual genera un escalón topográfico diferencial de pendientes (Garrido, 1984). El escalón generado corresponde a un plano inclinado con una serie de abanicos aluviales con un sentido de depositación hacia el oeste, formando el piedemonte andino (Naranjo y Varela, 1996). Los procesos tectónicos influyen ampliamente en la geomorfología del prospecto regional de estudio, ya que el movimiento inverso del bloque colgante de la Cordillera Occidental sobre el plano de falla de San Ramón es evidenciado preliminarmente por el alzamiento y exhumación de las formaciones Abanico y Farellones, en conjunto a la deformación en los depósitos holocenos que subyacen al plano (Rauld, 2002, 2011). Además, existen espolones de cerros con orientación E-W, lo que se puede explicar con un escarpe de falla con erosión retrógrada (Sepúlveda, 1998). Es de notar que el catalizador de estos cambios geomorfológicos en el sector fue principalmente asociado al comienzo de compresión, alzamiento y exhumación inicial de la Cordillera de los Andes. Finalmente, el piedemonte engrana hacia el oeste con los depósitos aluviales de los ríos Maipo y Mapocho, los cuales corresponden a la mayor parte del relleno sedimentario de la cuenca.

Las geomorfologías con génesis antrópica también son predominantes en el área y conllevan desde nuevos túneles kilométricos para el transporte de personas y explotación de recursos geológicos en toda la Región, hasta la modificación topográfica industrial de las figuras de remociones en masa o la intervención de acuíferos, capas de confinamiento de aguas y redes efímeras presentes al este del prospecto de estudio, de forma más local. Las modificaciones tanto a los afloramientos como a los depósitos por el impacto humano como un agente sedimentario ha generado nuevos modelados del relieve desde la rápida expansión y cimentación de la ciudad entre 1960 y 1970, los cuales surgen de diferentes impactos a las geomorfológicas erosivas y depositacionales del área, ya sea tanto de forma local y directa (Modificación de pendientes de ladera, modificación de exposición de laderas, modificación de redes fluviales de primer orden) como de modificaciones indirectas (Modificación de procesos erosivos y depositacionales, cambios en el ciclo hídrico y climático.)

4.2 Marco Geológico

4.2.1 Geología regional

En la zona occidental y central de Santiago afloran las unidades sedimentarias del Cretácico superior definidas formalmente como Formación las Chilcas, Lo Valle y Salamanca (Rivano et al., 1993; Charrier et al., 2007; Jara y Charrier, 2014), los cuales corresponden a afloramientos de rocas piroclásticas ácidas, rocas extrusivas ácidas y rocas sedimentarias con proveniencia de ambiente volcanosedimentario de intraarco (Rivano et al., 1993; Ramos, 1996).

En la zona oriental de la Depresión Intermedia, Aguirre (1960) reconoce una secuencia de rocas volcánicas y volcanoclásticas continentales, asignadas a la Formación Abanico, de edad Eoceno a Mioceno inferior (Aguirre, 1960; Klohn, 1960; Vergara y Drake, 1978; Thiele, 1980; Charrier, 1981; Vergara et al., 1999; Astaburuaga et al., 2012), que aflora con manteos suaves de 25-30°E. Esta formación comprende tobas y brechas volcánicas con intercalaciones de lavas riolíticas a andesíticas, depósitos volcanoclásticos y depósitos sedimentarios clásticos lacustres. El contacto inferior de la franja occidental de la Formación Abanico ha sido descrito como discordante (Vergara y Drake, 1979); aparentemente concordante (Gana y Wall, 1997) o de interdigitación (Thiele, 1980); mientras que el de la franja oriental como una discordancia angular (Klohn, 1960), concordante (Thiele, 1980) y tectónico (Godoy y Palma, 1990).

Entre los 30°30'S y los 34°S, la Formación Abanico se encuentra intruida por plutones de edad Mioceno inferior, los cuales presentan una variación composicional microgranodiorítica a andesítica porfíricas (Naranjo y Varela, 1996).

Sobre la Formación Abanico, se reconoce una secuencia de lavas, ignimbritas y tobas con intercalaciones de brechas volcánicas y rocas sedimentarias correspondientes a conglomerados, areniscas y lutitas, asignadas a la Formación Farellones de edad Mioceno inferior a Mioceno medio (Thiele, 1980; Rivano et al., 1990), las cuales afloran como una franja N-S en la Cordillera Principal. A diferencia de la Formación Abanico, esta secuencia está mejor estratificada, presenta menos deformación y mantiene una disposición subhorizontal posterior a su exhumación. De todas formas, ambas columnas se encuentran en alzamiento producto del movimiento inverso de la traza del Sistema de Falla Pucuro.

El contacto entre Formación Abanico y Farellones ha sido ampliamente debatido y descrito de diferentes formas (Aguirre, 1960; Klohn, 1960; Charrier, 1973, 1981; Thiele, 1980; Moscoso et al., 1982; Godoy, 1988, 1991; Godoy y Lara, 1994; Godoy et al., 1999; Charrier et al., 2002)

producto de la heterogeneidad de los esfuerzos tectónicos ocurridos en los eventos deformativos de la cuenca de Abanico y la actividad volcánica que se intercala con los depósitos sedimentarios evidenciados en esta (Jara y Charrier, 2014). En la figura 4.3 se presenta la Geología de Santiago.

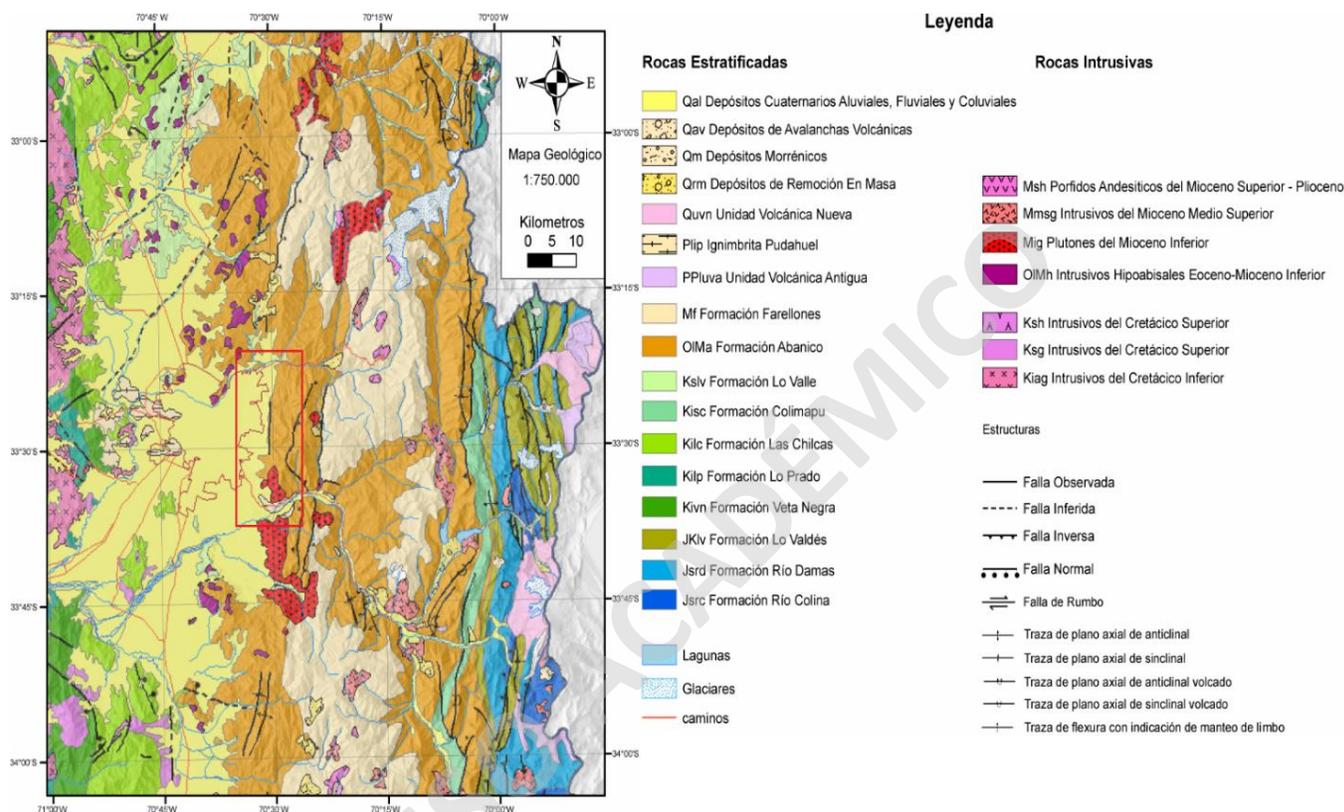


Figura 4.3: Mapa geológico de Santiago. En rojo, prospecto de estudio. Mapa modificado y extraído de Fock (2005).

Estructuralmente, en el sector oriental de la Región Metropolitana se encuentra el Sistema de Falla Regional Pocuro, el cual ha sido descrito como una megafalla, comprendida entre los 33°S y 32°S (Rivano, 1996). Esta destaca como uno de los elementos mayores en la provincia de Santiago.

La falla de San Ramón (Rauld, 2002) perteneciente al Sistema de Falla Pocuro, deforma continuamente tanto a los afloramientos de Formación Abanico como a los depósitos de remociones en masa en el frente cordillerano, principalmente a los depósitos aluvionales Pleistocenos y Holocenos (Vargas et al., 2018). Esta falla posee un carácter inverso, dirección de rumbo aproximadamente N-S, variando en algunos tramos a NNW-SSE (Rauld, 2002; Armijo et al., 2010; Rauld, 2011), la cual presenta un desnivel de aproximadamente 400 m entre el bloque colgante y yacente (Naranjo y Varela, 1996) donde las estructuras de deformación frágil en las unidades rocosas y la deformación maleable de depósitos sintectónicos cuaternarios predominan.

4.3 Descripción local del área de estudio

4.3.1 Geomorfología

El mapa geomorfológico local se fundamenta mediante revisión bibliográfica, foto geología y al trabajo de campo dentro de la cuenca. Las fuentes bibliográficas para la geomorfología local fueron Rauld (2002, 2011), mientras que el formato de leyenda y simbología incorpora las definiciones de Jennings (1977) y el formato propuesto por Gutiérrez (2008).

La escala de trabajo para el mapeo geomorfológico (Figura 4.4) es de 1:14.000, en base a las recomendaciones de SERNAGEOMIN y Lara (por comunicación oral, 2022).

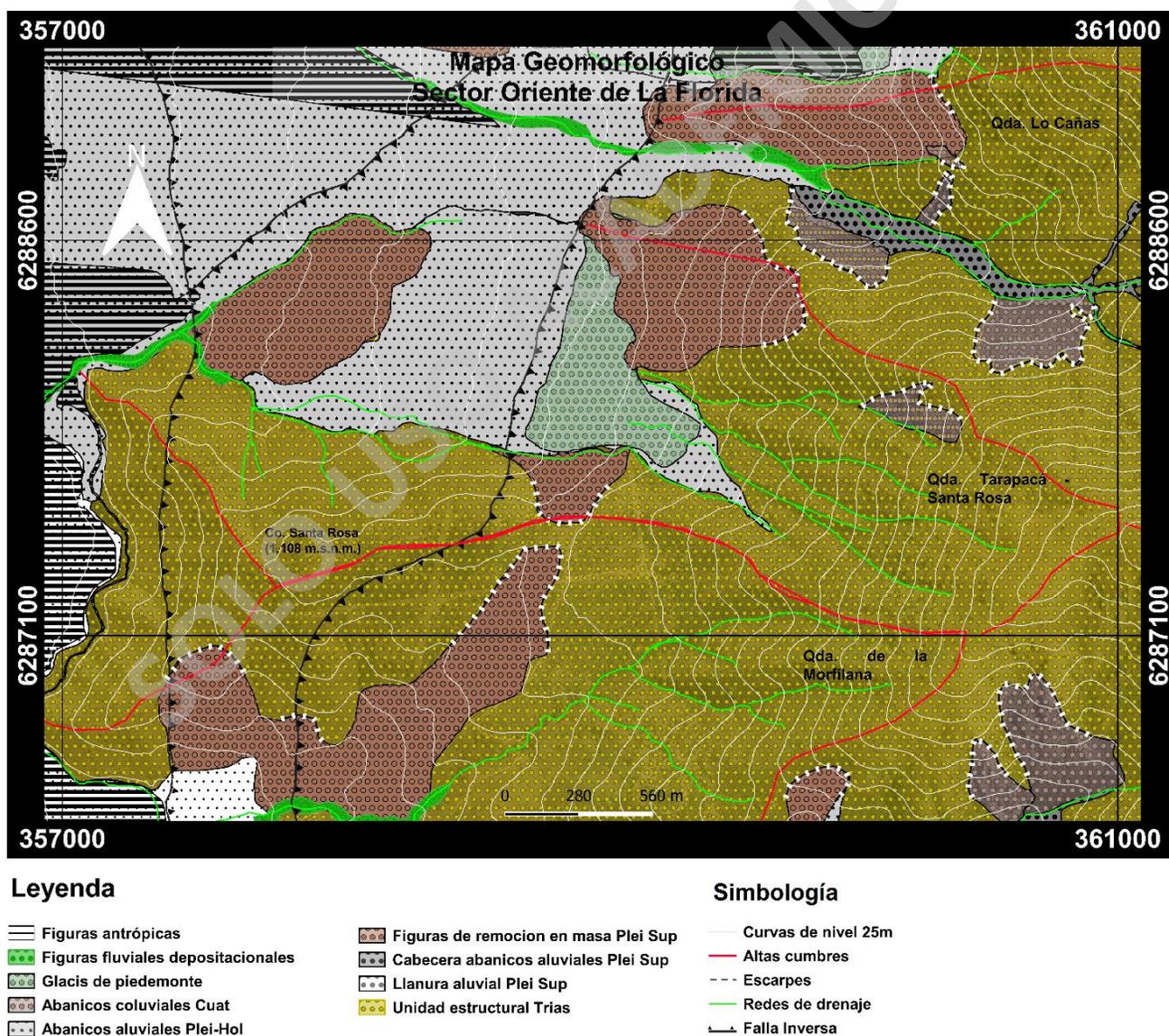


Figura 4.4: Mapa geomorfológico del sector oriente de comuna de La Florida y hoyas hidrográficas respectivas.

El área de estudio se interpone entre las geomorfologías regionales principales de Chile Central, la Depresión Intermedia y la Cordillera de los Andes. Quebrada Tarapacá – Santa Rosa se encuentra localmente adyacente a la geomorfología regional del Piedemonte Precordillerano, forma modificada topográficamente tanto por los procesos erosivos y depositacionales asociados a las confluencias fluviales que nacen desde las líneas de altas cumbres de la cuenca, como también por procesos tectónicos relacionados al plano de Falla de San Ramón y procesos de antropización para el asentamiento de la comunidad humana en el sector oriente de Santiago.

La cuenca Quebrada Tarapacá – Santa Rosa presenta una extensión latitudinal de aproximadamente 4 km y una extensión longitudinal de al menos 1,6 km, con una superficie de 3,17 km². La quebrada, a diferencia de las cuencas adyacentes de mayor escala, presenta una morfología elíptica con una diferencia entre sus ejes de 2,4 km (Más asimétrica que Quebrada Las Vizcachas o Quebrada Lo Cañas), donde las redes de drenaje paralelas prehistóricas han estado modificando continuamente gran parte de la porción más occidental de la Formación Abanico y los propios depósitos aluviales que le dan la topografía al piedemonte. Estos macroprocesos dinámicos erosivos provocan una elongación casi E-W de la cuenca, siguiendo la orientación preferente del manto principal de la hoya y la línea de rumbo de la geoforma estructural en sus redes secundarias.

La delimitación de las altas cumbres de la cuenca está compuesta principalmente por 2 facetas erosivas de la geomorfología estructural de la Formación Abanico (Cuchilla norte y cuchilla sur). Los cerros que constituyen la cuchilla norte corresponden a las laderas noroccidentales de los cerros Tarapacá (2.462 m.s.n.m.) y Minillas (2.468 m.s.n.m.), mientras que el Cerro Santa Rosa (1.108 m.s.n.m.) constituye la cuchilla sur en la porción más occidental. Es de notar localmente que, la cuchilla norte y la cuchilla sur presentan una diferencia importante respecto a la extensión latitudinal de ambas, donde existe una diferencia de al menos 1,7 km en la elongación de estas, siendo la cuchilla sur la geoforma predominante con 4 km desde la desembocadura hasta el límite oriental de la cuenca. Este proceso erosivo diferencial de la cuenca (que puede ser explicado por la erosión asociada más bien a los cauces más caudalosos pertenecientes a Quebrada Lo Cañas con proveniencia desde el norte), en conjunto a las modificaciones antrópicas del sector han generado que la red de drenaje principal fuese encausada directamente a los pies de la cuchilla sur de la cuenca, generando una incisión profunda sobre las geomorfologías climáticas depositacionales del sector, principalmente a los abanicos aluviales Pleistocenos – Holocenos. Celis (2018) describe 5 geomorfologías de pequeñas quebradas con orientación E-W, las cuales se presentan rellenas de

depósitos aluviales y coluviales, con desarrollo de suelo y figuras fluviales pequeñas. El sistema se constituye por 4 valles bien definidos en la cabecera y un valle de desembocadura (Figura 4.5). Los valles a mayores latitudes presentan poca estrechos y gran profundidad, mientras que el valle de menor latitud se caracteriza por muy poca estrechos y menor profundidad que en la cabecera.

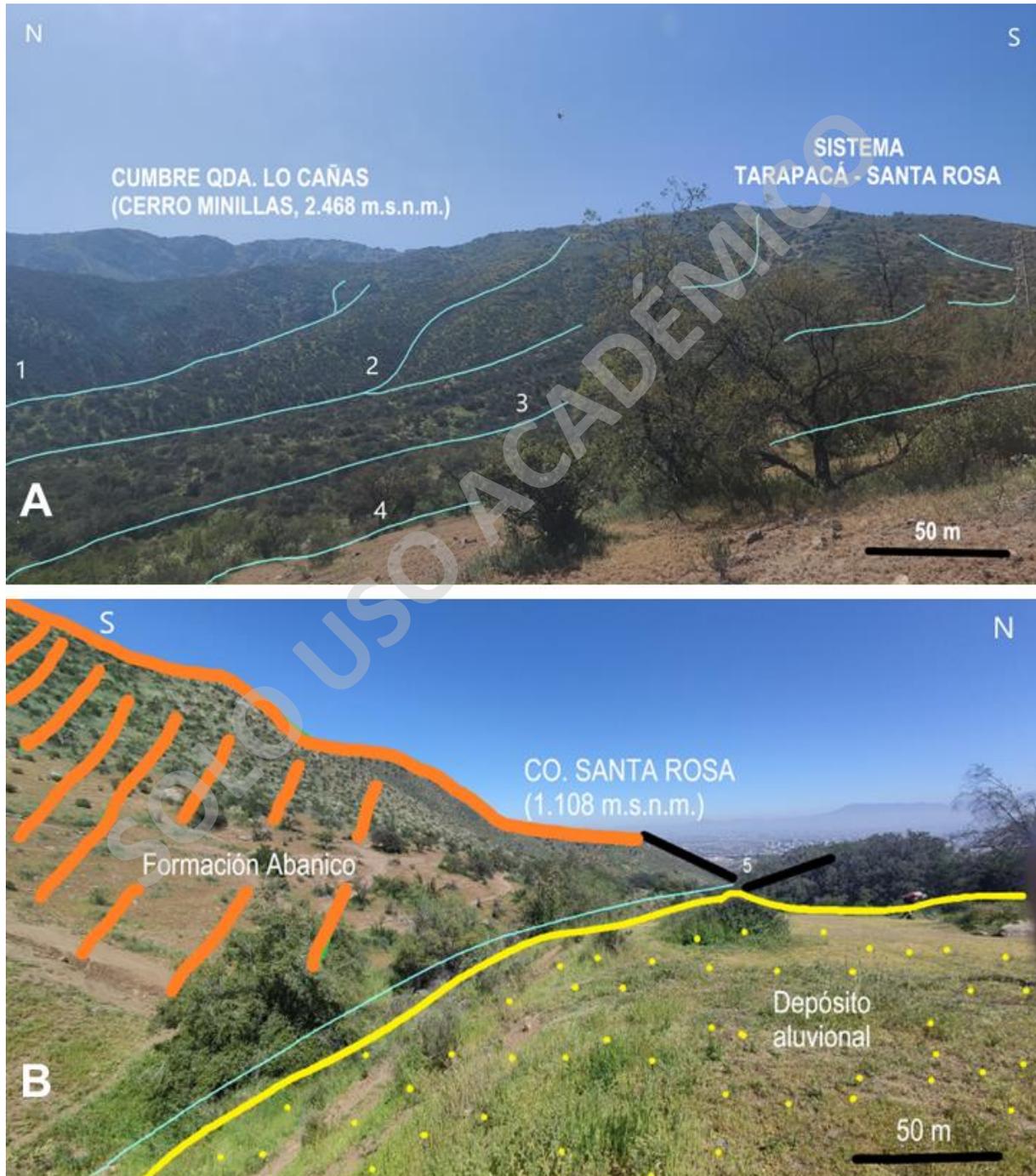


Figura 4.5: De arriba abajo, A: visión de la cabecera del Sistema Tarapacá – Santa Rosa. B: valle fluvial principal.

Los valles de cabecera presentan un ancho de entre 350 a 400 m, el cual aumenta hacia la desembocadura hasta los 450 m, con clasificaciones de encajonamiento medio y bajo respectivamente. Esta red principal se encausa hasta aproximadamente los 600 m.s.n.m., en dirección al canal san Carlos hasta la desembocadura al Zanjón de la Aguada, cauce intervenido antrópicamente desde el inicio de Quebrada Lo Cañas y Quebrada de Macul. Se observa modificación antrópica en la porción de cabecera y en la zona media, sin contenciones aluviales. Respecto a las pendientes de la quebrada (Figura 4.6), en la cabecera la hoya se presenta una morfología escarpada de entre los 35° a 45°, encontradas alrededor de la cota 2.000. Las laderas laterales de la parte superior y media también poseen pendientes relativamente escarpadas, promediando unos 25° a 30° como tope (Laderas de suelo residual de la Formación Abanico). Cabe destacar que producto de la erosión continua de la geomorfología aluvial, se han desarrollado nuevas facetas erosivas con laderas escarpadas sobre los 30° que no logran ser evidenciadas en los productos de las imágenes satelitales, principalmente producto del efecto “sombra” de vegetación.

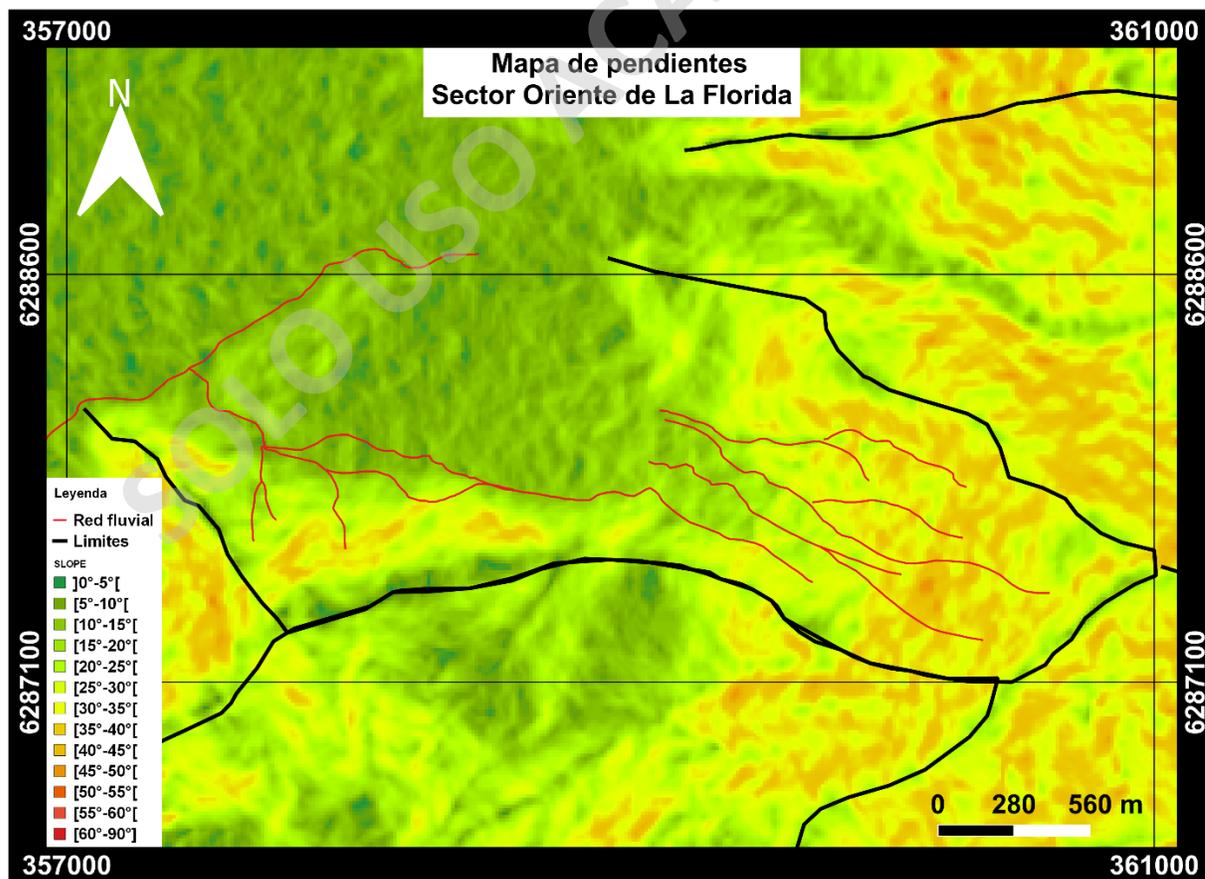


Figura 4.6: Mapa de pendientes del sector oriente de comuna de La Florida.

La sección media está conformada desde el nacimiento de las quebradas a los 1.770 m.s.n.m., hasta el quiebre de pendiente a los 1.270 m.s.n.m. y se presentan pendientes entre 15° a 25°. Las cinco quebradas del sistema nacen en los 1.770 m.s.n.m., con pendientes de 25° aproximadamente y se encuentran estabilizadas por vegetación, junto con algunas acumulaciones de detritos (Celis, 2018). La sección inferior abarca desde los 1.270 hasta los 1.000 m.s.n.m., correspondiente al quiebre de la pendiente y transición a las geomorfías aluviales y de pedimentos (Figura 4.7). La ladera norte presenta depósitos coluviales escasos y escombros de falda, mientras que los abanicos aluviales mantienen su topografía escarpada, los cuales modelan el pie de la cuenca. En la ladera sur predominan los depósitos coluviales y escombros en los faldeos de la cuchilla, mientras que aproximadamente entre los 1.400 y 1.060 m.s.n.m. se observan depósitos de remoción en masa antiguas, con bajas pendientes y forma de meseta, coincidiendo con la zona de plano de falla.

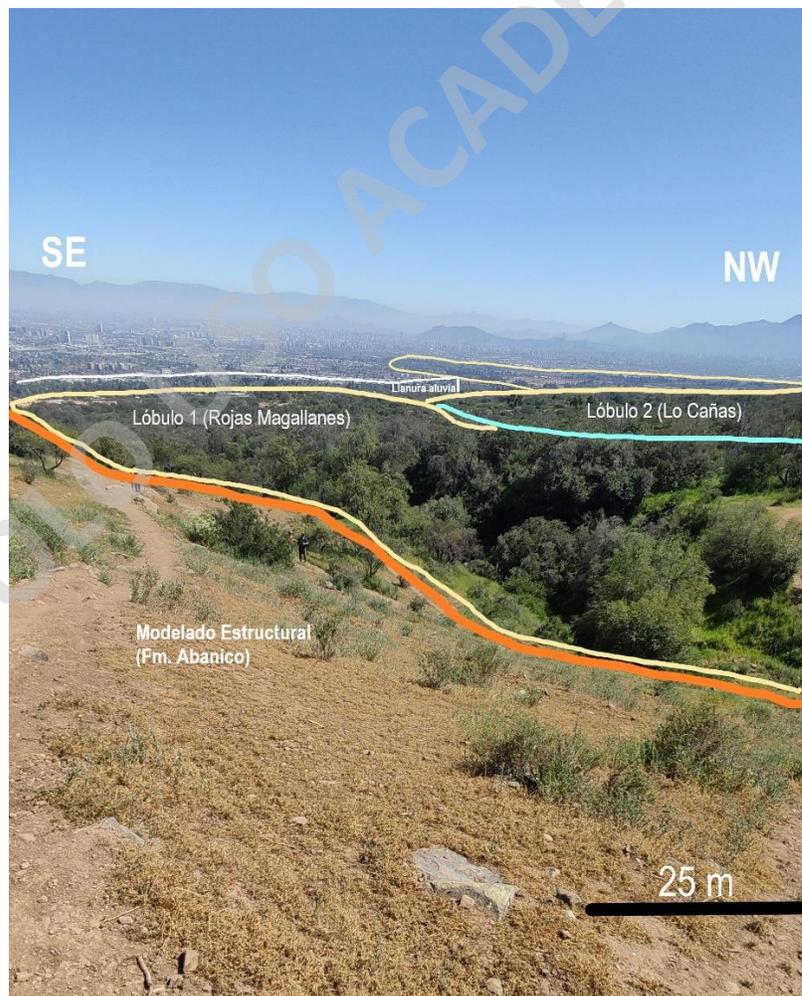


Figura 4.7: Geomorfologías naturales ubicadas en la desembocadura del Sistema Tarapacá – Santa Rosa.

Desde los 1.060 m.s.n.m. se observa suelo residual de la Formación Abanico en el cerro Santa Rosa y existe una cantidad aceptable de afloramientos rocosos pertenecientes a la geomorfología estructural predominante del área para el estudio.

La geomorfología que predomina en el sector occidental del polígono de estudio son 2 lóbulos de flujos de detritos dispuestos en sentido oeste que modelan el relieve en las porciones bajas de la cuenca. Este piedemonte está conformado a partir de depósitos climáticos, principalmente depósitos de flujos de detritos y depósitos de glaciares que generan una geomorfología heterogénea producto de las características geológicas de ambas geoformas y por consecuencia, también se produce una erosión diferencial a lo largo de la columna sedimentaria que responde a la variación granulométrica de las diferentes porciones de los depósitos de remoción en masa. El lóbulo más al norte presenta longitudes de 2,5 km desde la desembocadura, mientras que el cono aluvial sur (intervenido antrópicamente por el límite de comuna de La Florida) presenta 1,7 km.

Finalmente, el modelado antrópico asociado al avance de la antroposfera oriental de Santiago predomina en las porciones occidentales de la cuenca, donde se evidencian principalmente cortes a los depósitos de flujos de detritos para la construcción de: condominios; tomas de agua; parcelas; parques recreativos y contención aluvional, mientras que el relieve de los abanicos aluviales también es modificado por la depositación de volúmenes de roca y suelo, externos a los procesos naturales de la cuenca, en conjunto con diferentes modificaciones al cauce actual de esta, generando obstrucciones, ensanchamientos y angostamientos de este para la correcta movilización de la gente hacia el Parque Comunitario Panul.

La cuchilla sur se ve ampliamente afectada por la modificación humana en aproximadamente 1 km, contando desde el inicio de la cuchilla hasta las puertas del Parque Panul. Cabe destacar también que la confluencia de personas en el parque (desde los 940 a 820 m.s.n.m.) provoca una abundante intervención antrópica; el suelo se presenta compacto, fuertemente erosionado y con baja proporción de materia orgánica y árboles producto de la realización de diferentes deportes (principalmente en bicicleta y motocicleta), en conjunto de actividades como el trekking hacia las cabeceras de la cuenca (Principalmente hacia Cerro Santa Rosa y Cerro Minillas).

En la figura 4.8 se puede apreciar la distribución de exposición al sol de las laderas de la hoya respecto al norte. A pesar de que existe intervención a las pendientes de las laderas, estas bioturbaciones no modifican sustancialmente la orientación respecto a la exposición solar de las unidades geomorfológicas del área.

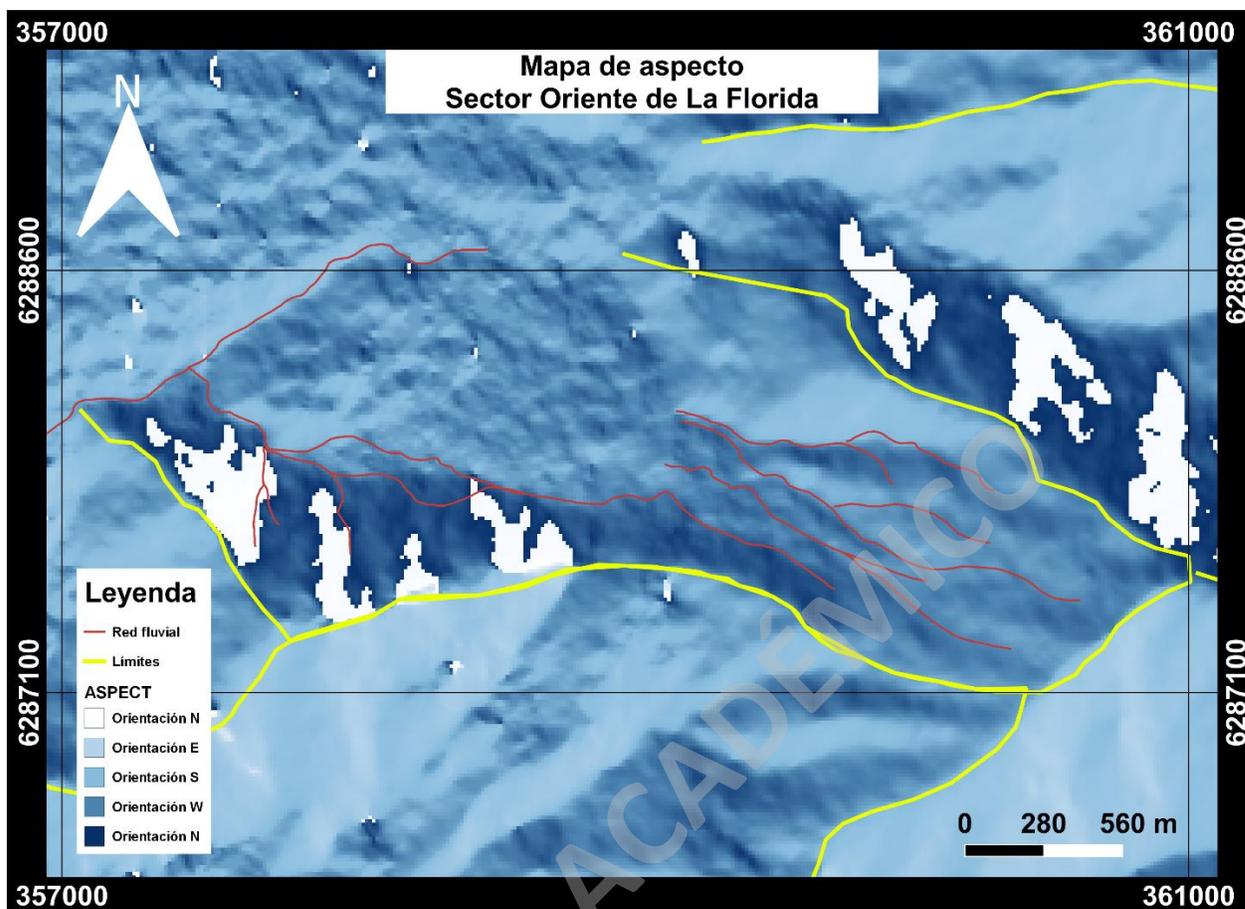


Figura 4.8: Mapa de aspecto u orientación de laderas del sector oriente de comuna de La Florida.

Es de notar algunas diferencias del relieve entre las longitudes 357.000 y 361.000, ya que se presentan heterogeneidades geomorfológicas entre las quebradas del sector, principalmente respecto a la presencia de afloramientos rocosos que evidencian una exhumación diferencial a otras latitudes cercanas localmente, lo que individualiza esta quebrada de las otras cuencas adyacentes.

4.3.2 Geología

La geología local fue reconocida mediante revisión bibliográfica, foto geología y al trabajo de campo dentro de la cuenca. Las fuentes bibliográficas para la geología local fueron Naranjo y Varela (1996) y Rauld (2002, 2011). La escala de trabajo para el mapeo geológico fue 1:14.000, en base a las recomendaciones de SERNAGEOMIN y Lara (por comunicación oral, 2022).

En la figura 4.9 se pueden observar las distintas unidades geológicas de la zona, los límites de las hoyas hidrográficas, en conjunto de las estructuras principales del área.

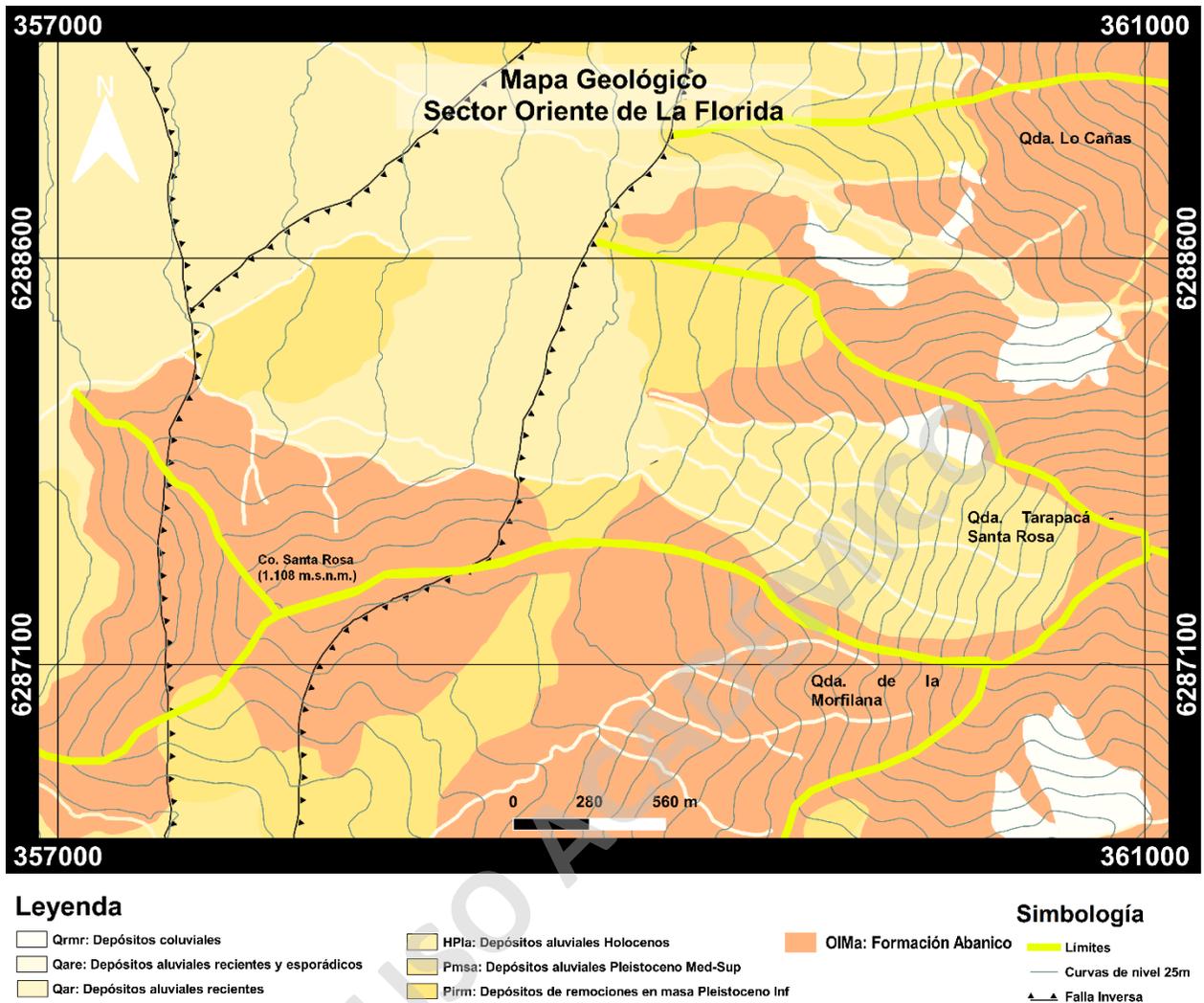


Figura 4.9: Mapa geológico del sector oriente de comuna de La Florida.

La geología del sector en estudio está caracterizada por el afloramiento de la porción occidental de la Formación Abanico definida por Aguirre (1960), asignada con edades Eoceno a Mioceno inferior (Aguirre, 1960; Klohn, 1960; Vergara y Drake, 1978; Thiele, 1980; Charrier, 1981; Vergara et al., 1999; Astaburuaga et al., 2012). Los componentes de esta formación en la quebrada se reconocen por el afloramiento de secuencias de rocas volcánicas como tobas y brechas con intercalación de lavas riolíticas a andesíticas en conjunto a areniscas y lutitas, las cuales afloran en paredones por erosión con rumbos N-S y manteos variados de entre 30° a 70°E de base a techo respectivamente, pero los contactos de esta formación se encuentran cubiertos por los depósitos más actuales.

Las rocas que afloran en la cuchilla sur y norte presentan diaclasas y estructuras de deformación en la estratificación como pliegues a distintas escalas, donde existe un aporte volumétrico

significativo de detritos de grava (métricos), acumulados en el lecho del cauce principal y/o en el pie, cuerpo y techo de las laderas que conforman la hoya hidrográfica, tal y como menciona Celis (2018). En ese estudio, el contenido y aporte detrítico dentro de la cuenca se asocia principalmente a la deformación, meteorización y alteración diferencial en las rocas producto de la estratificación, laminación, fracturas de las columnas y percolación de agua, disminuyendo la calidad geotécnica. Dentro de la geología del área predominan también los depósitos sedimentarios de remociones en masa Cuaternarios, estos son claramente evidenciados por coronas de remoción, rampas de caída o figuras de depositación presentes tanto en el piedemonte como en las porciones más altas (sobre los 750 m.s.n.m.). Los depósitos aluviales se presentan mayoritariamente: semi consolidados; matriz soportados; con laminaciones grano decrecientes; contactos difusos en las porciones bajas de la cuenca y erosionados por el agente acuoso y humano, mientras que, en las porciones altas, las cabeceras de aluviones Pleistocenos se presentan rellenando cauces con menor consolidación que la parte inferior, caracterizada por depósitos clasto soportados, pobres en estructuras, pero manteniendo las figuras grano decreciente. Gran parte de la vegetación ha estabilizado aquellos sectores donde se han generado cortes naturales y antrópicos a las columnas de estos.

Estos depósitos de flujo se engranan a los afloramientos de la Formación Abanico en conjunto a los depósitos de remociones en masa antiguos, lo cuales modifican en menor medida la topografía del sector y la dirección de la red de drenaje principal producto de las características de meteorización de las rocas presentes en el área. Estos depósitos de remoción en masa antiguos fueron definidos por Naranjo y Varela (1996) como depósitos de remoción en masa y por Sepúlveda (1998) como depósitos diamícticos antiguos. Los componentes de estos depósitos son principalmente clastos métricos a centimétricos con carácter matriz soportado. La morfología evidencia algún proceso de remoción tipo deslizamiento.

Algunos autores reconocen acumulaciones alargadas, de orden métrico, de depósitos de cenizas que subyacen a los depósitos. Estas acumulaciones se asocian al evento que dio origen a la Ignimbrita Pudahuel (Naranjo y Varela, 1996; Wall et al., 1996), de edad 450.000 ± 60.000 A. P (Stern et al., 1984), en donde la edad mínima puede asociarse a los depósitos que cubren a la Formación Abanico y a los diferentes depósitos de remociones antiguas, tales como los depósitos aluviales. Los depósitos de suelo por meteorización del protolito han sido definidos en la literatura por Sepúlveda (1998) y Ferrando (2014) en Quebrada Lo Cañas y Quebrada Tarapacá – Santa Rosa respectivamente, donde los espesores críticos han sido caracterizados con potencias de 2 a 3 m.

En el área se reconocen lineamientos que se asocian a estructuras mayores definidas en la bibliografía (Rauld, 2002, 2011). Éstos pueden ser los posibles causantes de las trazas de quebradas y la configuración de depósitos actuales (Celis, 2018). Dentro de la geología local, se evidencian eventos de deformación sobre las columnas de rocas y los depósitos sedimentarios.

En total se define una unidad de roca y seis unidades de suelo mapeables, entre ellas los depósitos de remoción en masa antiguos, depósitos aluviales y depósitos coluviales. Los depósitos de escombros de falda y la formación de suelo residual actual en laderas también son descritos.

4.4.2.1 Unidades de roca

La única unidad de roca presente en el área ha sido formalmente definida previamente por Aguirre (1960), y actualizada mediante los estudios cronoestratigráficos de Klohn, 1960; Vergara y Drake, 1978; Thiele, 1980; Charrier, 1981; Vergara et al., 1999 y Astaburuaga et al., 2012.

a. Formación Abanico (OIMa)

Esta unidad se presenta en todo el área oriental de la zona de estudio. Las secuencias estratificadas que afloran en el prospecto están compuestas por lavas riolíticas a andesíticas de grano fino a medio, tobas de lapilli y ceniza con matriz oxidada, en conjunto a brechas volcánicas. En los afloramientos se aprecian intercalaciones de depósitos volcanoclásticos y sedimentarios que incluyen estrato de lutita y areniscas de grano fino, en conjunto de volcanoarenitas rojas y verdes. Estas rocas presentan estratificación con contactos netos, de rumbo aproximado N-S y un manteo que varía entre los 30° (porción de desembocadura) a 70°E en las porciones más altas de la cuenca.

La potencia total de la columna asociada a Formación Abanico que aflora en el sector es de aproximadamente 1500 m, mientras que las potencias individuales de los estratos son métricas.

En general, las rocas presentan un alto índice de fracturamiento (Figura 4.10) y una alteración notoria a la matriz, los colores verdosos y rojizos pueden sugerir procesos de cloritización y oxidación respectivamente. Las rocas menos competentes corresponden a lavas de grano fino (andesitas) e intercalaciones sedimentarias (lutitas y areniscas de grano fino), mientras que las rocas más competentes (volcanoarenitas de clasto grueso) se fracturan en bloques mayores entre los sets de estructuras, los cuales son depositados como coluvios y escombros de falda en la zona baja. En las porciones altas, estos se presentan como depósitos de caída de clastos métricos (Celis, 2018).

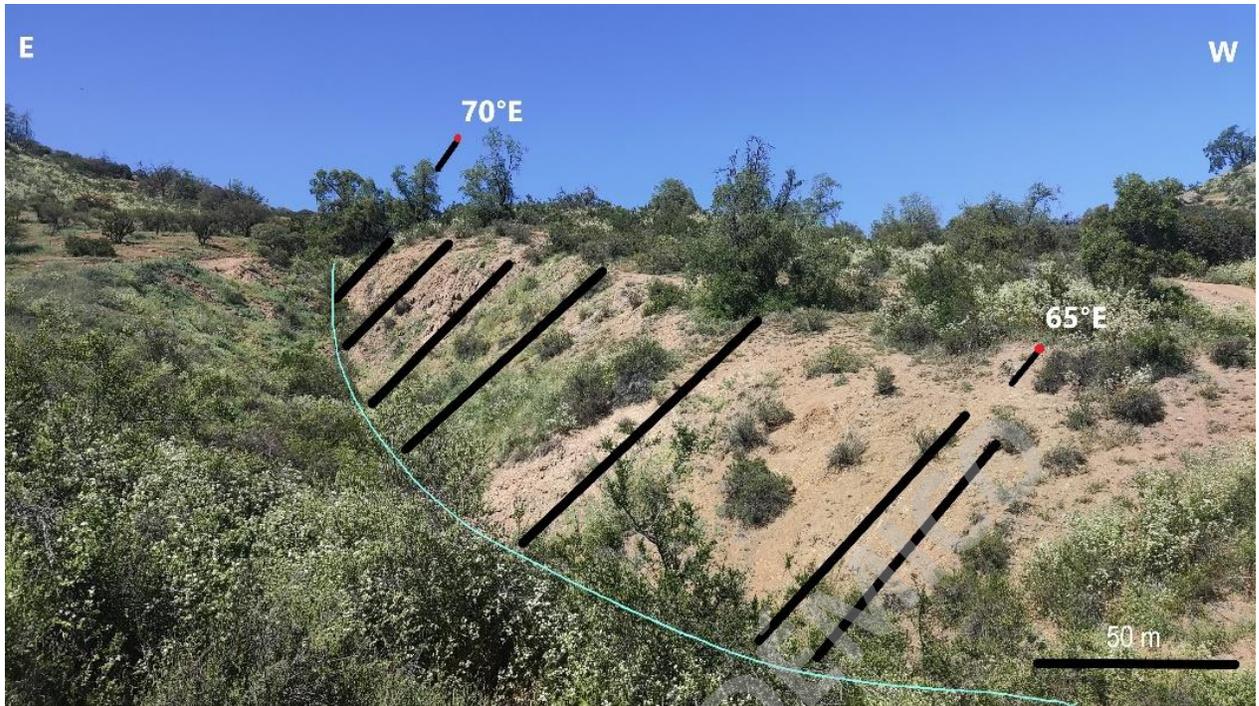


Figura 4.10: Columna estratificada de conglomerados con volcanoarenitas verdes y desarrollo de suelo correspondientes a las rocas exhumadas de Formación Abanico. Visión hacia el sur.

4.4.2.2. Unidades de suelo

Estas unidades han sido definidas previamente por Sepúlveda (1998), Ferrando (2014) y Celis (2018). Sus características han sido corroboradas y actualizadas con las diferentes fases de terreno.

a. Depósitos de remociones en masa Pleistoceno Inferior (Pirm)

Estos depósitos fueron definidos por Naranjo y Varela (1996) como depósitos de remoción en masa y por Sepúlveda (1998) como depósitos diamícticos antiguos. La morfología evidencia algún proceso de remoción tipo deslizamiento en la hoya, principalmente en las zona baja y media (Figura 4.11). Los componentes de estos depósitos son principalmente clastos métricos a centimétricos con carácter matriz soportado, incluyen fragmentos de rocas sedimentarias clásticas y volcánicas principalmente de tamaño hasta más de 2 m. Se presentan clastos angulosos a subangulosos inmersos en una matriz que varía de tamaño limo a arcilla, sin desarrollo de estructuras laminación y estratificación con contacto difuso dentro del sector de estudio. La compacidad de estos depósitos es firme a dura, plasticidad media a alta (Celis, 2018) y la calidad del suelo desarrollado es moderada a buena.



Figura 4.11: Depósito de remoción en masa antiguo aterrazado, Quebrada San Ramón. Imagen extraída de Celis (2018).

b. Depósitos aluviales Pleistoceno Medio – Superior (Pmsa)

Estos depósitos corresponden a la exposición de las cabeceras de los abanicos aluviales Pleistocenos en el sector medio y alto de la quebrada. Estos depósitos han sido datados en el Pleistoceno tardío y se encuentran sobrepuestos sobre la Formación Abanico.

Los depósitos presentan granulometría variable con predominancia de bloques métricos de grava con proveniencia volcánica y sedimentaria. Se pueden observar (Figura 4.12), en general, presencia de grandes bloques angulosos semiesféricos de 3 m en la zona media y de 1,5 m en las zonas distales en depósitos soportados en matriz de arena muy fina a fina con proporciones 40-60% respectivamente, pobres en estructuras de gradación inversa y sin estructuras de laminación. Este tipo de materiales implica una construcción del abanico por torrentes esporádicos con alta carga de sólidos, responsable de los sedimentos más finos y de la movilización de material con bloques métricos por la quebrada, debido a su alta energía y baja intermitencia (Celis, 2018). La compactidad de estos depósitos es firme, con plasticidad media y la calidad del suelo desarrollado es moderada a buena. Las cabeceras aluviales se encuentran cubiertas por depósitos coluviales, depósitos aluvionales recientes y esporádicos. En la zona baja, el lóbulo de desembocadura también se encuentra cubierto por los depósitos aluvionales Holocenos más recientes en escala geológica.



Figura 4.12: Depósito aluviales Pleistoceno Medio – Superior, cabecera Sistema Tarapacá – Santa Rosa.

c. Depósitos aluviales Holocenos (HPla)

Los conos en las desembocaduras de las quebradas principales se engranan junto a los depósitos de conos aluviales más antiguos generando el piedemonte del frente cordillerano (Celis, 2018), cubriendo así los depósitos Pleistocenos. Estos abanicos están ubicados en la zona alta, media y baja, los cuales son cubiertos por depósitos aluvionales recientes y esporádicos (Figura 4.13).

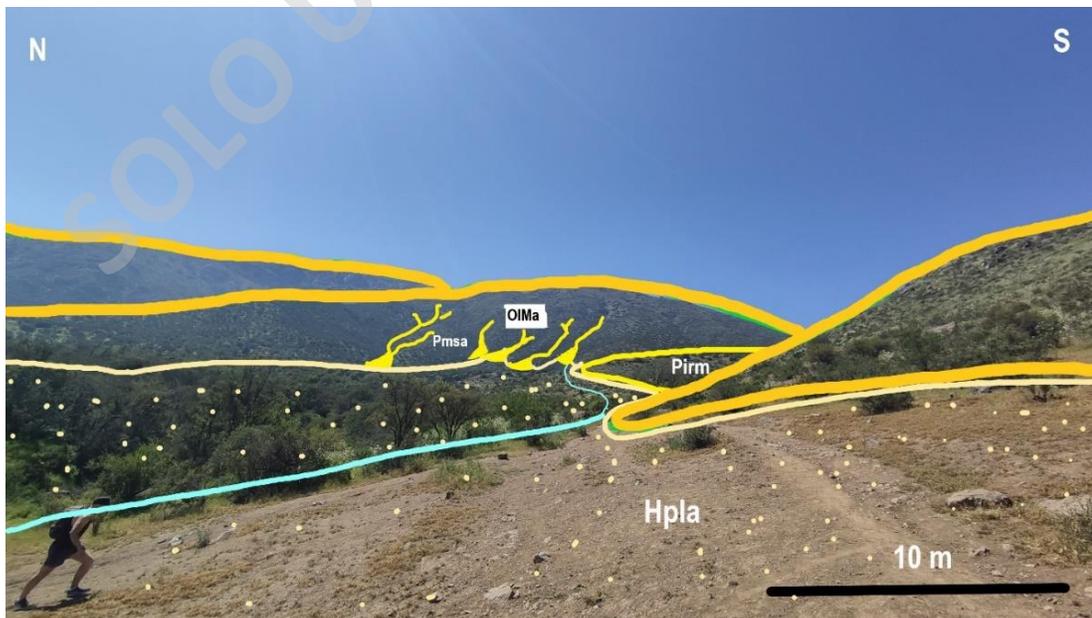


Figura 4.13: Sección de cuerpo del Depósito aluvional Holoceno principal y geología local.

Geomorfológicamente hablando y en base a las interpretaciones de terreno, esta unidad de suelo preserva la cabecera, el cuerpo y el pie de los abanicos aluviales Holocenos, donde se evidencian al menos 2 lóbulos mayores, correspondientes al cauce mayor de Quebrada Lo Cañas y al cauce de Quebrada Tarapacá – Santa Rosa, siendo este último el cual presenta los cortes naturales que mejor evidencian las componentes geológicas de toda la columna de estos depósitos.

La cabecera de estos depósitos presenta clastos con granulometría variada de bloques de grava a gravilla semi angulosos y semiesféricos de origen polimíctico en un 30% de 1,5 a 3 m soportados en matriz de arena media a muy fina en un 70%. La vegetación es densa hasta los 700 m.s.n.m. y los materiales se entrapan fácilmente, provocando mayor estabilidad en laderas con sombra.

El cuerpo del abanico principal, depósito sectorizado en las porciones medias del cuenca, está caracterizado por un depósito polimíctico de facies matriz soportado con clastos métricos a centimétricos de rocas ígneas intrusivas, extrusivas y piroclásticas en conjunto de rocas sedimentarias clásticas inmersos en matriz de arena muy fina variando a limo. El depósito presente en Quebrada Tarapacá – Santa Rosa preserva caras frescas a lo largo de la erosión del cauce, donde se aprecian las estructuras predominantes de clastos grano decrecientes, en contraste a la cabecera que no presenta estas estructuras. Las estructuras de laminación y predominancia de clastos centimétricos marcan el límite con el pie del depósito, sin embargo, el contacto es difuso.

El pie de los abanicos Holocenos del área se presenta como una facies con mayor contenido de matriz, mejor selección, predominancia de clastos centimétricos y que presenta más estructuras de depositación respecto al cuerpo. Dentro del depósito se presentan clastos angulosos sub redondeados y poco esféricos con estructuras de clastos grano decrecientes y predominancia de laminaciones en los sectores de menor altura. En los sectores más bajos del abanico además se presentan clastos de tamaño métrico subyaciendo a las laminaciones, marcando el frente de arrastre del flujo con los depósitos primarios de gravas.

Estos depósitos en general son heterogéneos y comprenden un área importante, presentan un mayor grado de compactación que los depósitos aluvionales más recientes, pero siguen siendo erosionados tanto en las cabeceras de los abanicos como en las redes de drenaje, lo que dificulta su análisis.

La columna estratigráfica de estos abanicos es evidenciada en los cauces principales que desembocan hacia la ciudad (Figura 4.14), pero en la gran mayoría de la sección producida por la red fluvial se presenta desarrollo de suelo con proveniencia del mismo abanico estabilizado por vegetación que cubre las facetas erosivas del depósito generado por el cauce principal de la hoya.

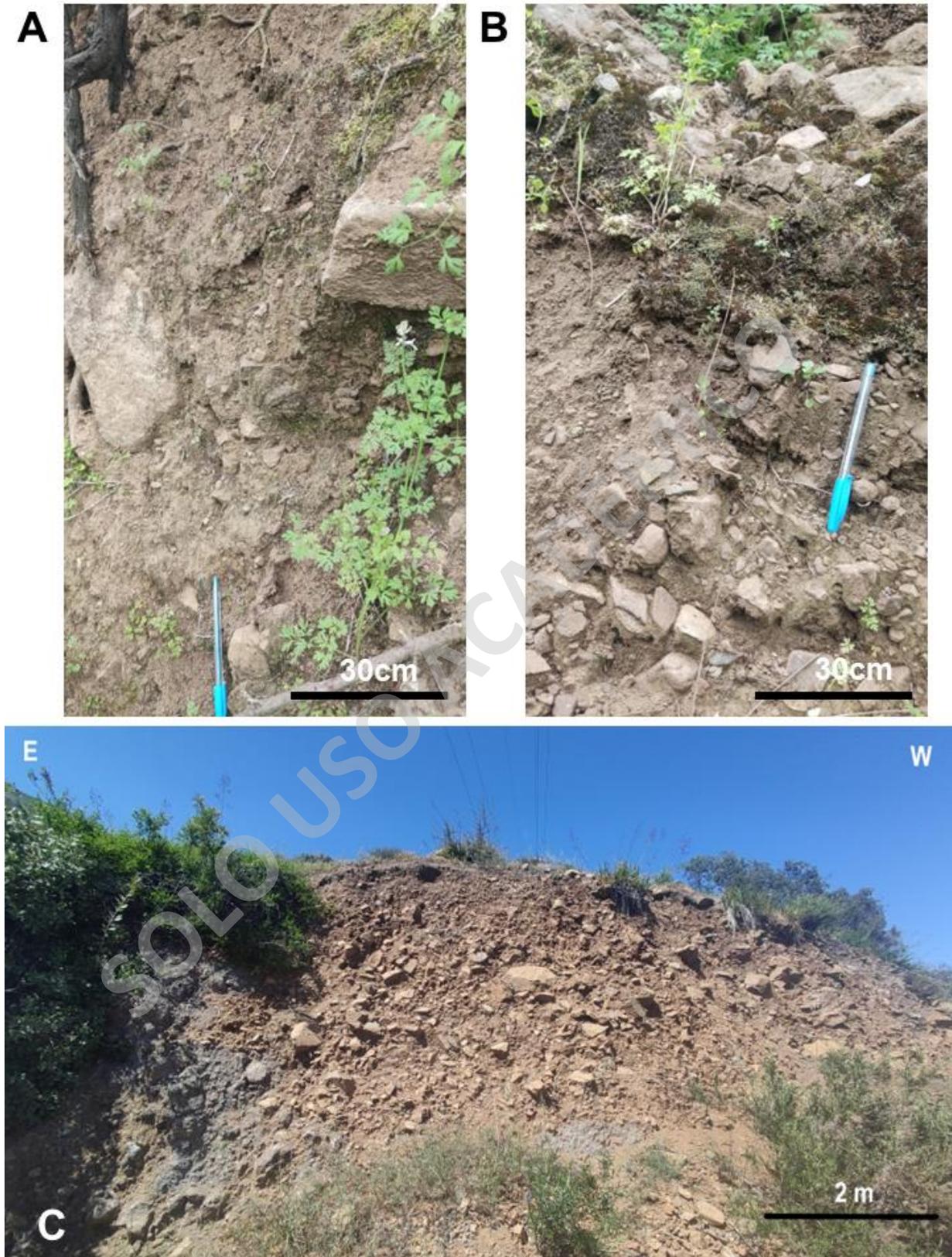


Figura 4.14: Columna del abanico aluvial Holoceno del Sistema Tarapacá – Santa Rosa, de base a techo. A: Sección del pie aluvial B: Sección del cuerpo aluvial C: Sección de cabecera aluvial. Nótese los cambios en la granulometría.

d. Depósitos aluviales recientes Cuaternarios (Qar)

Conforman el relleno en la cabecera del cauce principal, así como sus tributarios en las zonas altas de Quebrada Lo Cañas. Corresponde a sedimentos depositados por los últimos eventos de flujos de detritos ocurridos en 1993 y en menor grado por procesos de precipitaciones anómalas que provocan subidas en el volumen de agua de los cauces y que provocan flujos en una menor escala.

Celis (2018) describe flujos con sentido E-W que, desde la cabecera hasta la zona apical, se presenta una mayor cantidad de bloques y una escasa matriz, donde progresivamente va aumentando la proporción de matriz a medida que los bloques disminuyen su tamaño.

Los fragmentos corresponden a rocas extrusivas de andesitas y dacitas con cristales mayores de grano fino a muy fino y rocas sedimentarias clásticas de areniscas principalmente, con proveniencia de Formación Abanico. La compactación es suelta en todo el depósito, el tamaño máximo de bloques es de 5 m y se presentan a los flancos del cauce, en forma de levées con gravas (Figura 4.15) con alturas de más de 1 m y cauces centimétricos. El espesor del depósito es mayor a 3 m (Celis, 2018).



Figura 4.15: Depósito aluvial Cuaternario y nueva red erosiva, subyacente a los depósitos Holocenos.

e. Depósitos aluviales recientes y esporádicos Cuaternarios (Qare)

Corresponden a los nuevos depósitos de flujos menores producto de la erosión continua tanto de los abanicos Pleistocenos como de los abanicos Holocenos. Estos depósitos conforman el relleno actual de la red primaria, los cuales están caracterizados por ser pobres en estructuras y presentar una baja compacidad (Figura 4.16), pero la evidencia de campo marca la sectorización de la formación del frente de nuevos abanicos con el depósito de clastos métricos de tobas, andesitas, dacitas y areniscas inmersos en matriz de grano limo a arena muy fina.



Figura 4.16: Depósito aluvial reciente y esporádico ubicado en redes de drenaje auxiliares. Porción media de la cuenca.

f. Depósitos coluviales y escombros de falda (Qrmr)

Esta unidad está compuesta por aquellos depósitos gravitatorios más actuales, integrando los depósitos coluviales y los escombros de falda como unidades mapeables. Estas unidades se presentan generalmente en todas las porciones de la hoya, relleno de facetas erosivas por las redes de drenaje auxiliares en las partes altas y/o en gran parte del pie de las unidades geomorfológicas. Estos depósitos se generan a partir de la meteorización de macizos rocosos (Sucesión de Formación Abanico) cuyo material es posteriormente transportado gravitacionalmente como material detrítico. La granulometría de los depósitos clásticos de caída varía desde arcillas a bloques y el porcentaje de matriz varía desde 0 %, en depósitos coluviales, a 90%, en escombros de falda.

Los depósitos coluviales presentan buena selección y escasa matriz. Los fragmentos rocosos corresponden a tobas, brechas, andesitas, dacitas y areniscas tanto de la meteorización de Formación Abanico como de los clastos en los depósitos de flujos. Estos se presentan en gran parte de las cabeceras de las quebradas, usualmente con espesores mayores a 1 m. Los bloques de mayor tamaño (0,5 - 1 m.) se concentran en el centro de los depósitos y generalmente se encuentran en equilibrio inestable, donde sólo la angulosidad de los clastos permite la estabilización en pendientes de aproximadamente 35° a 40° en Quebrada Tarapacá – Santa Rosa.

Los escombros de falda corresponden a los depósitos gravitacionales presentes en las laderas de la porción media y baja de las quebradas, cubriendo los cortes naturales de los abanicos presentes en el área, cuyos parámetros geológicos y geotécnicos son utilizados para los estudios de susceptibilidad de remociones por estabilidad de ladera. En las porciones medias de la cuenca, estos depósitos se presentan con una proporción 80-20% matriz soportada con más de 1 m de espesor, los cuales derivan de la degradación de la Formación Abanico y los abanicos aluviales del sector. Se ubican generalmente en las laderas con orientación sur (Figura 4.17) y estos son estabilizada por la vegetación. Se pueden encontrar bloques angulosos de hasta 2 m de diámetro inmersos en una matriz limo-arenosa pardosa. En las porciones más bajas, el depósito matriz soportado aumenta el contenido de matriz a un 90%, tal y como evidencia Celis (2018).

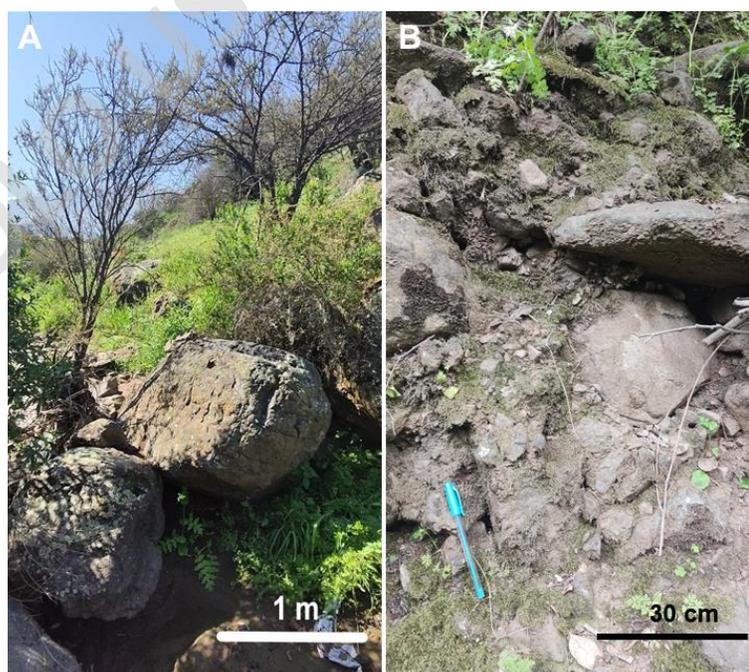


Figura 4.17: Unidades coluviales actuales. A: Depósitos coluviales de zona baja B: Escombros de falda de zona baja

g. Suelo residual de la Formación Abanico y de depósitos aluvionales

En el área se evidenciaron 2 diferentes columnas de suelo, las cuales difieren principalmente en las características granulométricas y la estabilidad geotécnica. Se puede inferir condiciones diferenciales de erosión y meteorización producto de la diversidad de protolito o por las condiciones de exposición solar que controlan la humedad, saturación y vegetación de las laderas, haciendo que el factor de estabilidad sea diferente. Se adhiere una descripción completa de la variación de suelo respecto a la exposición solar por ser unidades críticas en este trabajo.

La Formación Abanico presenta un desarrollo residual de suelo (Figura 4.18) de no más de 2 m de espesor cubriendo todas las laderas del afloramiento. Este suelo corresponde a un suelo arenoso suelto variando a compacto (en laderas con baja exposición solar), con bajo porcentaje de material fino limoso (<2 %) (Celis, 2018). La granulometría varía desde partículas tamaño limo a grava, la compactación es firme a blanda y es estable geotécnicamente, excepto en laderas con alta pendiente o con exposición norte, donde aumenta la granulometría y la compactación solamente es firme.

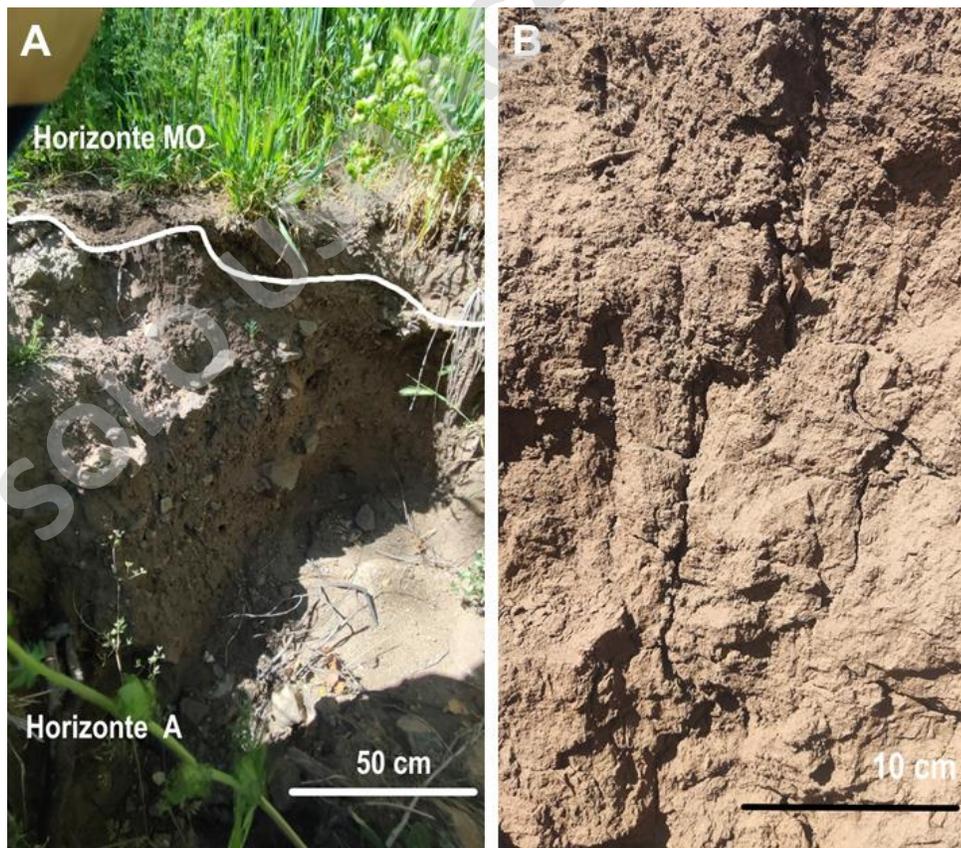


Figura 4.18: Suelo residual de la Formación Abanico. A: Desarrollo de suelo en ladera de baja exposición solar. B: Desarrollo de suelo en ladera de alta exposición solar. Nótese el cambio en la vegetación y en los clastos mayores.

La formación de suelo de los abanicos aluviales (Figura 4.19) presenta un desarrollo residual sobre los 2 m de espesor en gran parte del techo y los sectores laterales de estos depósitos. Este suelo corresponde a un suelo arenoso muy suelto con porcentaje de material fino limoso <5 %. La granulometría varía desde partículas tamaño limo a grava, la compactación es blanda y es relativamente estable, excepto en laderas con alta pendiente o con exposición norte. En laderas de orientación sur generalmente presentan condiciones de humedad que mejoran la plasticidad y compactación de los granos, pero la calidad de cohesión puede verse afectada por la permeabilidad.



Figura 4.19: De izquierda a derecha, suelo residual de proveniencia aluvial en ladera de baja (a) y alta (b) exposición.

4.3.3 Estructuras locales

Un aspecto para considerar en la producción de detritos y la estabilidad de las laderas es la relación del manto del estrato y la orientación de la ladera en donde se encuentra (Ferrando, 2014). El rumbo N-S de los estratos aflorantes de Formación Abanico es perpendicular a la dirección de exposición de las laderas en Quebrada Tarapacá – Santa Rosa (Cuchillas con exposición sur y exposición norte) al menos en las porciones bajas de la cuenca, generando que las estructuras de estratificación estén bien marcadas (Figura 4.20) y presenten mayor meteorización (Thiele, 1980;

Araya-Vergara, 1985). Esto genera un sector con alta producción de detritos y taludes detríticos que pueden ser removilizados posteriormente (Celis, 2018). En la zona de estudio se puede observar 3 estructuras de falla pertenecientes al tramo de la Falla San Ramón, la cual deforma a la Formación Abanico (Rauld, 2002, 2011) y a los depósitos superficiales Pleistocenos (Vargas et al., 2018). Estas estructuras presentan sentido de rumbo NE-SW a modo general, pero existen porciones donde los planos mantienen rumbos N-S. Todas las estructuras identificadas poseen carácter inverso del movimiento (Rauld, 2002, 2011). Estudios geomorfológicos y estructurales en los depósitos y rocas han permitido estimar tasas de desplazamiento promedio del orden 0.13 mm/año a 0.40 mm/año, lo que, a escala de los últimos años, indica que se trata de una falla que representa un peligro potencial para la ciudad de Santiago (Armijo et al., 2010; Rauld, 2011). Además, existe una serie de fallas menores que afectan especialmente a la Formación Abanico, las cuales quedan en evidencia por una serie de bloques desnivelados dentro del sistema de laderas en donde se generan abruptos quiebres de pendientes y entre ellos facetas trapezoidales, como la que se puede observar en la cabecera de la quebrada de Lo Cañas (Ferrando, 2014). Además, Lara (2007) reconoce la presencia de roca argilizada y salbanda de falla en el tramo inferior de la quebrada San Ramón, cercano al camino de las torres de alta tensión, aspecto que se repite en la zona de estudio más al sur en Quebrada de Macul y Lo Cañas (Celis, 2018).



Figura 4.20: Traza mayor de la falla de San Ramón, escalón del piedemonte de La Florida y geología local.

4.3.4 Vegetación

La cuenca hidrográfica Quebrada Tarapacá – Santa Rosa ha sido albergue de uno de los últimos bosques de la Región Metropolitana. Los bosques de tipo esclerófilo son escasos dentro de la región y se encuentran confinados a fondos de quebradas y laderas bajas de exposición sur principalmente. En Santiago hacia la gran geoforma de la Cordillera de los Andes se logra diferenciar principalmente las formaciones vegetacionales denominadas Matorral Esclerófilo Andino y Bosque Esclerófilo de la Precordillera Andina, pertenecientes a las regiones ecológicas de la Estepa Alto Andina y del Matorral, en conjunto al Bosque Esclerófilo respectivamente (CME, 2015). El relicto de bosque El Panul evidencia que, en épocas antiguas, fue una gran masa boscosa de vegetación esclerófila, la cual se caracteriza por adaptarse al clima seco en verano y que solo necesita al menos tres meses de lluvia para mantenerse vivo (CME, 2015). La flora está compuesta por especies siempreverdes y perennes, las cuales combaten las pérdidas de agua por evaporación gracias a las hojas que desarrollan los árboles y arbustos. La vegetación presente en el área está condicionada por factores de humedad y temperatura principalmente, la cual se establece principalmente en las laderas de la hoya hidrográfica, compactando y estabilizando gran parte de las unidades geomorfológicas con orientación sur (Gajardo, 1994).

Debido a que esta es la zona del país más poblada, el paisaje original ha sido altamente modificado, por lo que gran parte de la vegetación presenta alteraciones, mientras que el relicto de bosque que aún se conserva esta inserto en tramos de la falla de San Ramón, el cual se emplaza dentro del fundo El Panul, el cual al no tener actividad agrícola importante ha permitido la mantención de estas especies que resisten el avance de la Antropósfera (CME, 2015).

Luebert y Pliscoff (2006) establecen 3 formaciones y cinco pisos vegetales para esta zona. El Matorral de altitud se presenta entre los 3.300 y 2000 m.s.n.m., el cual es representado en las porciones alta de la cuenca por el piso vegetal “Matorral bajo mediterráneo andino de palo amarillo y uva cordillerana” (3.300 a 2.600 m.s.n.m.), en conjunto al piso “Matorral bajo mediterráneo andino de hierba blanca y chilca” (2.600 a 2000 m.s.n.m.). La siguiente formación corresponde al Bosque esclerófilo representado por los pisos vegetales “Bosque esclerófilo mediterráneo andino de olivillo y guindilla” (en rangos altitudinales de 2.000 a 1.400 m.s.n.m.) y “Bosque esclerófilo mediterráneo andino de quillay y litre”, bajo las altitudes de los 1.700 m.s.n.m. Finalmente, la última formación corresponde al Bosque espinoso, representado por el piso vegetal del “Bosque espinoso mediterráneo andino de espino”, ocupando las laderas por debajo de los 1.200 m.s.n.m.

4.3.5 Clima, Hidrología e Hidrogeología

Chile tiene un amplio rango climático debido a la latitud del continente y otros factores como las geomorfologías, su altitud y el efecto de vientos y mareas en el territorio. El tipo de clima que caracteriza a la zona central de Chile se genera por influencia de masas de aire oceánicas procedentes del Cinturón de los Vientos Oestes (CVO) provenientes de latitudes templadas (Villagrán e Hinojosa, 2005). Este sistema es responsable prácticamente de todas las lluvias de la zona centro-sur del país en invierno, y en verano, la presencia del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur genera el período de sequía típico de las épocas más calurosas del año (Villagrán e Hinojosa, 2005). La Región Metropolitana en términos globales tiene un clima de tipo mediterráneo semiárido que se extiende desde Coquimbo hasta la Región del Bío Bío (Di Castri y Hayek, 1976). Este se caracteriza por inviernos fríos y lluviosos y veranos cálidos y muy secos, características que varían dependiendo de la posición geográfica de la porción continental (es decir, varía tanto de norte a sur como de este a oeste por las diferencias en el relieve y su altura). Sin embargo, este clima está cambiado por el efecto del fenómeno de Cambio Climático, con una disminución de precipitaciones y un aumento de la temperatura (Searle y Rovira, 2008)

En Chile, hacia el año 2040 se espera un aumento de la temperatura cercana a los 3°C en la zona central, lo que provocará modificaciones en las comunidad vegetales, posiblemente con desplazamientos de las especies hacia porciones con mejores condiciones. Las precipitaciones también se modificarán disminuyendo en la zona centro y como consecuencia, aumentaría la aridez modificando la humedad de las cuencas hidrográficas de Chile Central (CONAMA, 2007)

Ninguna de las quebradas en el polígono de estudio presenta una escorrentía continua durante el año y sólo se asocian a caudales superficiales esporádicos, dependientes de la cantidad de agua caída en cada evento de precipitaciones o el deshielo presente en los periodos estivales. El caudal presente en Quebrada Tarapacá – Santa Rosa depende completamente de la captación de agua desde vertientes aguas arriba, precipitaciones y deshielos en las zonas altas (Celis, 2018).

El nivel freático se encuentra, aproximadamente entre 130-150 m de profundidad, correspondientes a datos de la Dirección General de Aguas (DGA) y el Banco Nacional de Aguas (BNA) (Vergara y Verdugo, 2015). La permeabilidad de los suelos corresponde a 10^{-5} - a 10^{-4} m/s para la Formación Abanico, 10^{-5} - a 10^{-7} m/s para los depósitos aluviales, 10^{-5} - a 10^{-2} m/s para la zona apical de abanicos aluviales y 10^{-7} - a 10^{-4} m/s para la zona distal de abanicos aluviales (Garrido, 1984).

4.3.6 Sismicidad

El territorio de Chile Continental es una de las zonas con mayor sismicidad del mundo y presenta 3 tipos de fuentes sismogénicas: Sismos de interplaca; Sismos de intraplaca y sismos corticales de intraplaca. En la zona de estudio se puede observar la Falla San Ramón, con una sismica activa y constante (Centro Sismológico Nacional, 2022) fracturando la Formación Abanico (Rauld, 2002, 2011) y deformando depósitos superficiales (Vargas et al., 2018) y está caracterizada por tener una fuente sísmica cortical desde el Cuaternario. Leyton et al. (2010) utiliza métodos probabilísticos para obtener valores de aceleración horizontal máxima de 0,55g para un periodo de retorno de 475 años y de 0,72g para 1950 años, en la zona urbana de Santiago. Ensayos realizados por Pérez et al. (2014), arrojan valores promedio de aceleración horizontal máximos de 0,7-0,8g para un sismo de magnitud $M_w = 6.9$ en la Falla San Ramón, mientras que el estudio de Vargas et al. (2018) plantea que incluso se pueden alcanzar aceleraciones de 0,8-1,0g. Estudios más recientes como el de Lamperein-Polo et al. (2022), establece que entre los años 2011 y 2017, la traza de San Ramón presentó desplazamientos de subsidencia de los bloques con órdenes de magnitud de entre los -13,11 mm a los +9,89 mm, con una tasa de velocidad anual de entre -2,19 a 1,65 mm/año.

4.3.7 Antecedentes de remociones en masa

En base a los estudios geológicos de la zona, las evidencias de terreno e informes profesionales y de prensa, en el sector se han registrado eventos de remociones en masa prehistóricos de tipo flujo de detritos, deslizamientos de suelo y roca en conjunto de diferentes eventos de caída de roca, pero en la historia geológica más reciente, no se ha generado un evento de flujo de detritos de gran peligro y solo se han podido evidenciar crecidas anómalas de los cauces (Sepúlveda, 1998; Garrido, 2012). Los abanicos aluviales son considerados eventos prehistóricos de flujos de detritos datados desde el Pleistoceno tardío hasta el Holoceno tardío.

El último evento que generó un peligro importante para la población fueron los flujos de detritos ocurridos en las cuencas adyacentes de la Quebrada de Macul y Quebrada Lo Cañas en el año 1993, donde la Quebrada Tarapacá – Santa Rosa registró crecidas inéditas en el cauce durante ese evento de precipitaciones, provocando la incisión actual de la red de drenaje principal que se encuentra erosionando el piedemonte. En los años 2005 y 2016 también se registraron eventos anómalos de precipitaciones, donde se registraron crecidas de los cauces del sector oriente de la Región Metropolitana, alertando a gran parte de la población movilizándose del piedemonte urbanizado.

4.3.8 Intervención antrópica

Quebrada Tarapacá – Santa Rosa y la geología del sector en general presenta diversas trazas de bioturbación humana con diferentes escalas, cuyas descripciones específicas se encuentran dentro del Anexo 1. A gran escala se presenta el límite sur oriental de la Antropósfera de Santiago, donde la cimentación de las viviendas pertenecientes al histórico Barrio Lo Cañas y la construcción del condominio “Jardines de la Viña” son el primer evento de las geomorfología antrópicas. A mediana escala, se presentan cimentaciones de concreto para la contención de posibles aluviones en las porciones bajas de la cuenca en conjunto de diferentes cortes y aplanamientos para la demarcación de caminos. Este sector presenta una notable degradación por acción continua de las condiciones exógenas. Respecto a las trazas de baja escala, en el sector predomina la deposición de basurales pequeños y volúmenes de roca extra en el lecho y en las laderas de la quebrada. Se realizó un mapa de trazabilidad georreferenciado de las diferentes trazas de bioturbación humana (Figura 4.21) para Quebrada Tarapacá – Santa Rosa, subdividiendo la escala de las trazas humanas.

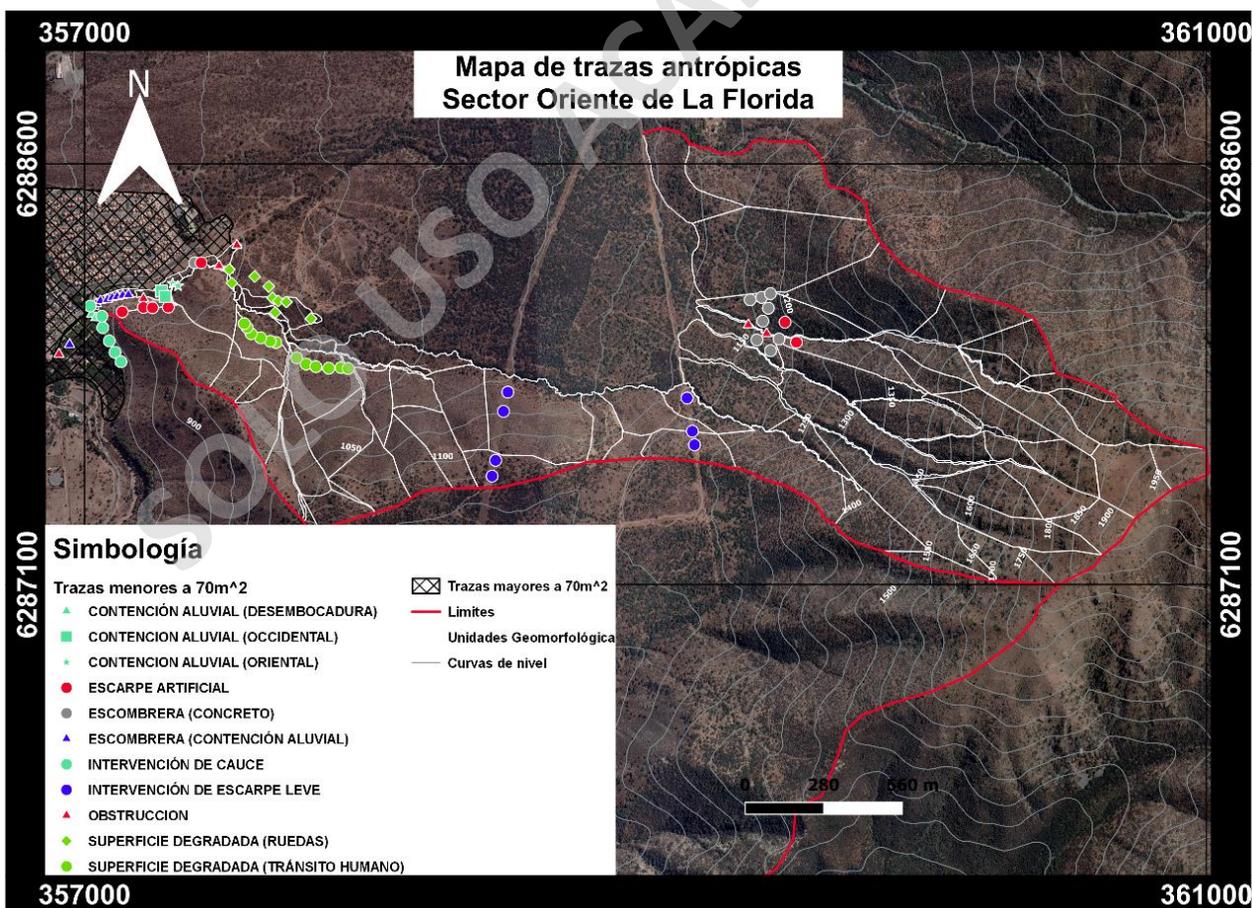


Figura 4.21: Mapa inventario de trazas antrópicas ubicadas en el sector oriente de comuna de La Florida.

4.4.8.1 Trazas de gran escala (> 1 km²)

El sector oriental de la Antropósfera de Santiago marca el primer hito de impacto estratigráfico en la cuenca a una macro escala. Esta se encuentra ubicada sobre los lóbulos y frentes de arrastre de los abanicos aluviales Holocenos (Fig. 4.22), modificando sustancialmente las geomorfologías de las porciones bajas de la cuenca.



Figura 4.22: Evolución y dirección de avance (flecha roja) de la Antropósfera del área. Nótese la primera aparición de aplanamiento del sustrato y los condominios sectorizados en la desembocadura del área desde 2005.

Las modificaciones más profundas a las geomorfologías predominantes de la zona fueron llevadas a cabo en la porción más occidental de la desembocadura, asociadas principalmente a la construcción y expansión del condominio “Jardines de la Viña” a comienzos del año 2000, el cual inició desde la intersección de Avenida Rojas Magallanes con Sánchez Fontecilla y ha ido expandiéndose hasta las puertas del Parque Comunal Panul. Este proceso de urbanización trajo consigo nuevos procesos de impacto estratigráfico a gran escala, como la construcción de colegios, supermercados e “stripcenters”, con una estabilización y aplanamiento de las diferentes porciones del terreno, en conjunto a la modificación previa de cauces primarios y auxiliares.

Tal y como se aprecia en la Figura 4.22, el impacto y las modificaciones han tenido un carácter sistemático, donde se presenta una arquitectura de utilización del suelo en forma de “nuevas dendritas habitacionales”, modificando la topografía tanto por las cimentaciones y fundaciones de las viviendas, como por el impacto estratigráfico en los sectores adyacentes a los condominios que sirven como espacios recreativos para las familias. El cauce de desembocadura de la quebrada (Orientación E-W), en conjunto al cauce auxiliar Canal San Carlos (Orientación N-S) presentan la mayor modificación de las condiciones geomorfológicas naturales de las diferentes figuras, esto debido a la conexión urbana de calles y pasajes, numerosos parques deportivos y recreativos e infraestructura crítica para la contención de los cauces. En estas modificaciones se realiza principalmente el aplanamiento y cortes tanto de suelo como laderas, con estabilizaciones de concreto en las porciones bajas de la hoya. Algunas de estas estabilizaciones han sido meteorizadas y destruidas con el paso de los eventos naturales, lo que aumenta la probabilidad de que las geomorfologías mayores cedan y fallen. Finalmente, gran parte de la geomorfología aluvional Holocena ha estado en disputa para nuevos proyectos producto del uso del suelo no urbanizado.

4.4.8.2 Trazas de mediana escala (0,14 km² – 1 km²)

Las trazas de mediana escala han sido identificadas principalmente como las implementaciones de infraestructuras de concreto en las porciones bajas de la cuenca para la contención aluvial. Debido a los eventos de flujos y crecidas ocurridas en 1993 dentro de las quebradas adyacentes, se fortificó la contención aluvial de las diferentes cuencas del sector oriente de Santiago, implementando infraestructura crítica a escala del cauce de la hoya hidrográfica que se está conteniendo.

Quebrada Tarapacá – Santa Rosa presenta diversas modificaciones en las porciones bajas tanto al cauce de la cuenca como en las laderas, con el fin de lograr la contención aluvial de la hoya. La evidencia de terreno implica que las laderas fueron contenidas con concreto y modificadas con el propósito de estabilización de la desembocadura de los cauces y la correcta fluidización de un eventual flujo de detritos, esto en conjunto a trazas de menor escala en el cuerpo y al pie de las laderas. Estas contenciones son de una menor escala, respecto a las ubicadas en Quebrada Lo Cañas, Quebrada de Macul o San Ramón. Las contenciones aluviales se presentan principalmente destruidas o en mal estado, alterando específicamente a dos unidades geomorfológicas de la zona baja de la cuenca, donde se evidencian claras modificaciones topográficas al relieve del sector (Figura 4.23).



Figura 4.23: Contención aluvial oriental en cuchilla norte de la zona aluvial baja.

Es de notar que existen al menos 3 muros de contención rígida (Desembocadura, occidental y oriental) y estos se preservan degradados por la continua acción de agentes naturales y la formación de suelo residual desde los abanicos, alterando la estabilidad y pendiente de las laderas por el disgregamiento tanto de los grandes volúmenes de roca que actúan como esqueleto de los murallones, como también del cemento que unía previamente a los guijarros.

El Parque Comunitario Panul se encuentra ubicado en la desembocadura de Quebrada Tarapacá – Santa Rosa y decenas de personas suben diariamente hacia las cabeceras de forma recreativa, por lo que se implementaron diversas intervenciones humanas para la conexión de la entrada o desembocadura de la cuenca hacia las cabeceras, utilizando como herramienta las primeras intervenciones de torres de alta tensión como un delimitador de camino preliminar.

A modo global, dentro de las porciones medias y altas de Quebrada Tarapacá – Santa Rosa se identificaron numerosas intervenciones antrópicas principalmente a la exposición de cabecera de los abanicos aluviales Pleistoceno Superior, en forma de miradores, reposeras o asientos para las personas que realizan trekking o mountainbike. Las trazas presentes fueron ubicadas en la porción noreste del polígono de estudio y corresponden a estabilizaciones laterales de concreto, disposición de tuberías para la fluidización de agua, cortes de ladera, delimitación de caminos y construcciones

de madera y cemento para la comunidad aledaña, tal y como se aprecia en la figura 4.24. Estas figuras antrópicas presentan una escala similar a las intervenciones de desembocadura y se preservan con una mejor calidad. Es importante notar que estas intervenciones pueden ser posteriores a los 2000 y que no tengan mucha relación con los aluviones ocurridos en 1993.



Figura 4.24: Contención aluvial occidental en cuchilla norte de la zona aluvial baja.

Si bien los miradores principales o de mayor altura no representan una modificación sustancial del relieve o de las laderas, existen zonas con trazas de bioturbación humana que no actúan como “zonas de descanso” y que presentan un área más importante de impacto. Estas zonas son características por presentar una intervención directa a las laderas en forma de cortes artificiales, cimentaciones de concreto, tuberías y cañerías para la estabilización de las porciones altas y un correcto drenaje de la quebrada (sector el cual ha sido identificado como una de las zonas con mayor probabilidad de desestabilización de laderas). Al igual que en la desembocadura, se interviene principalmente a los depósitos sedimentarios, se construye una infraestructura de concreto y luego dicha intervención es sellada con cemento directo a las laderas, para la correcta estabilización tanto de la unidad geomorfológica como de la construcción en sí.

4.4.8.3 Trazas de baja escala (0,14 km² <)

Sobre el cuerpo de las laderas y los pies de estas, diversas trazas de menor escala fueron identificadas en el sector. Estas trazas corresponden principalmente a volúmenes de roca para la contención aluvial, pequeños basurales, embotellamiento del cauce por tránsito humano y modificaciones geomorfológicas menores como encause antrópico con canaleta de la red esporádica de la hoya. Estas trazas también se encuentran ubicadas principalmente en las porciones bajas de la cuenca, dispuestas probablemente por la cercanía de la antroposfera a la cuchilla norte. Volumétricamente hablando, las trazas como las contenciones rocosas y basurales no representan una obstrucción importante del cauce debido al gran ancho de este, lo que no significa que no estén ejerciendo tensiones diferenciales sobre las laderas. Aun así, las obstrucciones por modificaciones menores, en conjunto a la vegetación boscosa y la depositación de nuevos detritos de escorrentía en la desembocadura del cauce pueden provocar un embotellamiento importante de los flujos.

5 Evaluación de susceptibilidad de remociones en masa

5.1 Definición de unidades geomorfológicas preliminares

Para la definición de las unidades geomorfológicas en Quebrada Tarapacá – Santa Rosa fue utilizado el concepto publicado por Lara y Sepúlveda (2010), es decir, una separación de la quebrada en diferentes unidades de terreno, las cuales sean diferenciables por cambios en el carácter geomorfológico y/o geológico. Esta definición referencia a estudios asiáticos, europeos y americanos en Lara (2007), la cual fue utilizada por primera vez en la Quebrada de San Ramón.

Los mapas preliminares fueron realizados mediante la combinación de capas ráster, con datos respectivos al ángulo de pendiente y orientación de ladera, en conjunto a la utilización de modelos 3D del sector mediante Sistemas de Información Geográficos.

Cada unidad es definida por un perímetro poligonal diferente, al cual se le puede asociar el puntaje proveniente de la escala de Índice de Susceptibilidad y que respecta principalmente a la descripción geológica; geomorfológica; geotécnica; climática y antrópica de la ladera misma.

Ferrando (2014) realizó estudios de susceptibilidad de remociones en masa para el piedemonte de Quebrada Tarapacá – Santa Rosa y Lo Cañas en base a componentes de amenaza y riesgo, donde

utiliza el concepto de “polígonos de integración” y define al menos 13 unidades de ladera. Celis (2018) por su parte, realizó la primera definición de unidades geomorfológicas de la Quebrada Tarapacá – Santa Rosa con la definición de Lara (2007), las cuales fueron publicadas posteriormente en Lara et al. (2018) (Figura 5.1). Esta figura fue realizada en base a un mapeo regional de todas las quebradas del sector sur oriente de Santiago, es decir, muchas de las unidades geomorfológicas publicadas fueron realizadas a través de imágenes satelitales con escalas más grandes respecto a la cuenca de estudio, por lo que el mapeo de unidades geomorfológicas puede diferir tanto en los límites perimetrales físicos como en los valores geomorfológicos de las laderas. Existen 2 diferencias principales respecto a los mapeos preliminares antiguos y a las unidades definidas por este trabajo. Existen zonas catalogadas con pendiente menores a 10° y que no fueron mapeadas como unidades geomorfológicas, ya que estas no presentan una escala visible dentro de los mapas regionales de la provincia de Santiago, mientras que la segunda diferencia es atingente a la escala, donde aumenta el número de unidades definidas por la ampliación visual de este factor.

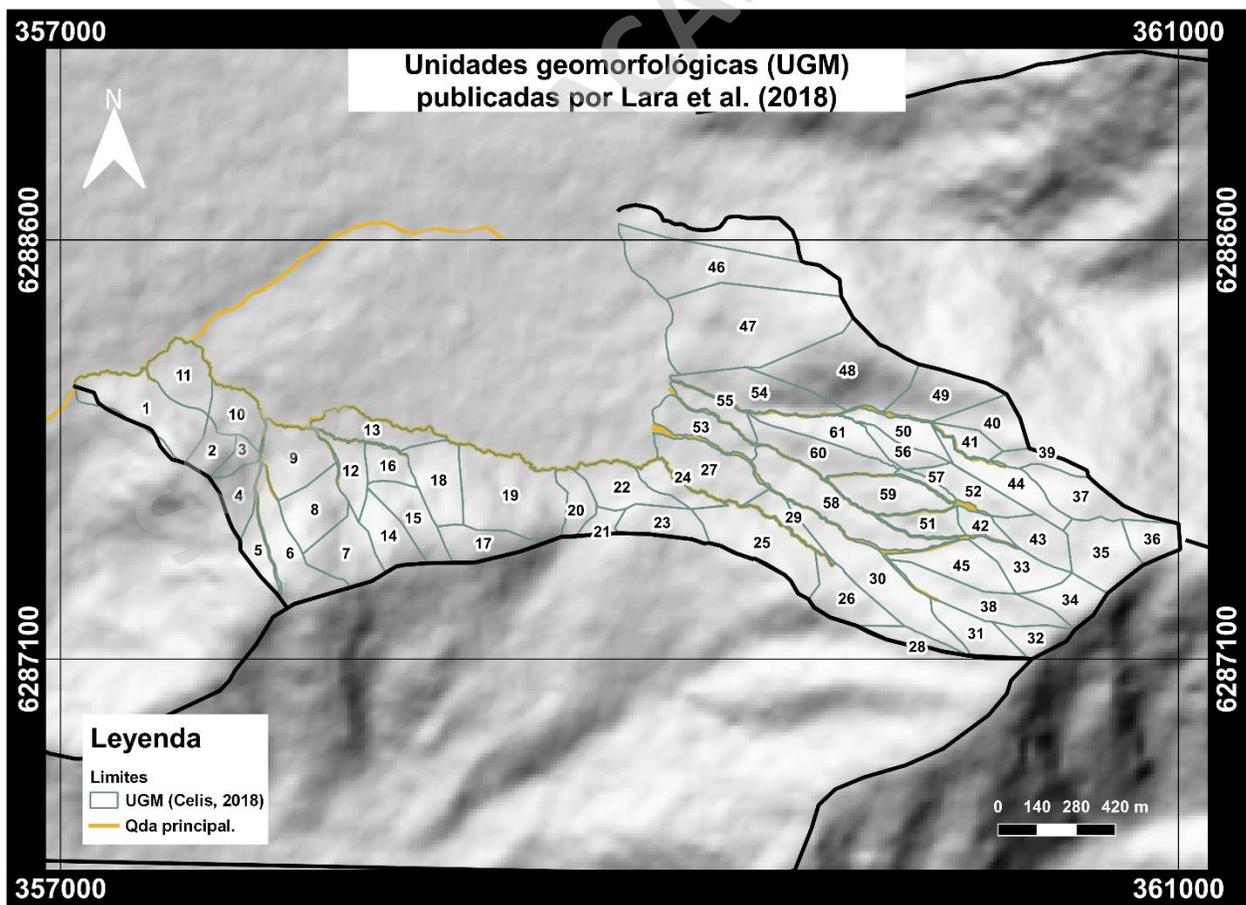


Figura 5.1: Unidades geomorfológicas (líneas verdes) definidas por Celis (2018) en Quebrada Tarapacá – Santa Rosa.

La escala de estudio de este trabajo (1:14.000) varía respecto al trabajo de Ferrando (2014) y la publicación de Lara et al. (2018), por lo cual se redefinieron las unidades previas y se aumentó el número de laderas en estudio principalmente en las porciones bajas de la cuenca, zona donde las unidades que presentan un impacto antrópico (y que se pueden individualizar geomorfológicamente) puedan ser visibles en los mapas de colorimetría. Celis (2018) define 64 unidades diferentes incorporando la información de imágenes ráster del sector sur oriente de Santiago principalmente, por lo que se aumentó preliminarmente (en base a foto geología e incorporación de modelos 3D de la cuenca) a 81 unidades de ladera (Figura 5.2) para el estudio de susceptibilidad de flujos, con la utilización de datos de resolución local, desde modelos de elevación digital e imágenes ráster. Posterior al dibujo de software, se revisaron las diferentes unidades geomorfológicas propuestas en las fases de campo y se lograron identificar variaciones en la información desde modelos digitales, por lo que se subdividieron algunas geomorfológicas producto del efecto de interferencia de la vegetación, el efecto de la sombra y las trazas humanas.

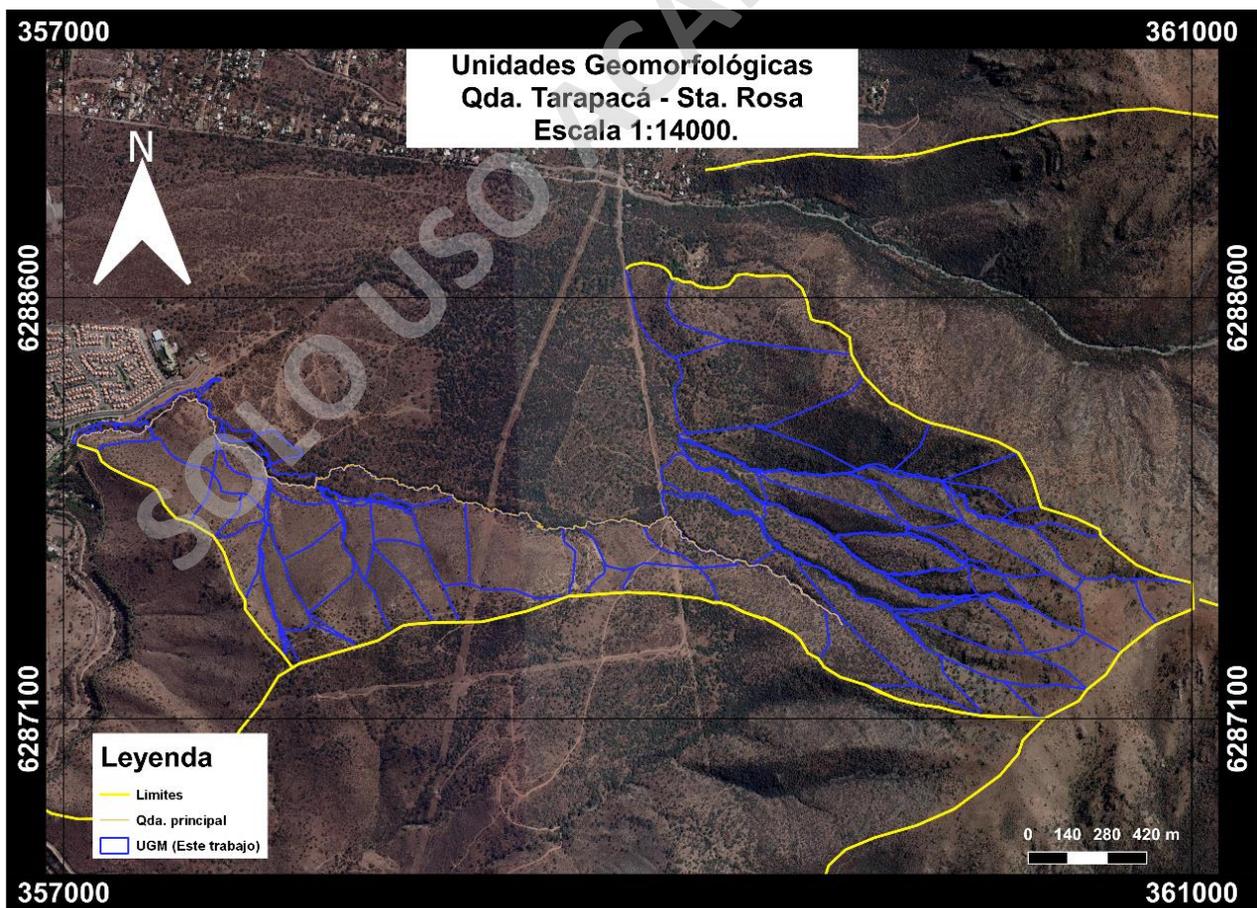


Figura 5.2: Unidades geomorfológicas preliminares definidas por este trabajo en Quebrada Tarapacá – Santa Rosa.

5.2 Definición de unidades geomorfológicas finales

La definición formal de unidades geomorfológicas para la Quebrada Tarapacá – Santa Rosa en este trabajo consta de 84 laderas (Figura 5.3) con longitudes variables de entre los 140 y 500 m. Esta separación fue realizada gracias a la recopilación de la fase G1; realización de la fase T1; propuesta de modelo de dibujo en la fase G2 y la posterior revisión de los datos preliminares de la fase T2.

El factor de escala fue electo para favorecer el aumento del volumen de datos en los mapas de susceptibilidad dentro de la quebrada. Para esto, se obtuvo información de las medidas de las trazas de mediana escala sobre las unidades y se realizó el dibujo de polígonos con un límite mínimo de área de 70 m² por ladera descrita. Las laderas menos extensas (70 m²) se encuentran ubicadas en la porción occidental de la hoya, las cuales componen a la actual cuchilla norte de la cuenca y que han sido formadas por la erosión del cauce principal y las afluentes esporádicas del norte que son direccionadas sobre los sedimentos que componen los abanicos aluviales Cuaternarios del sector.

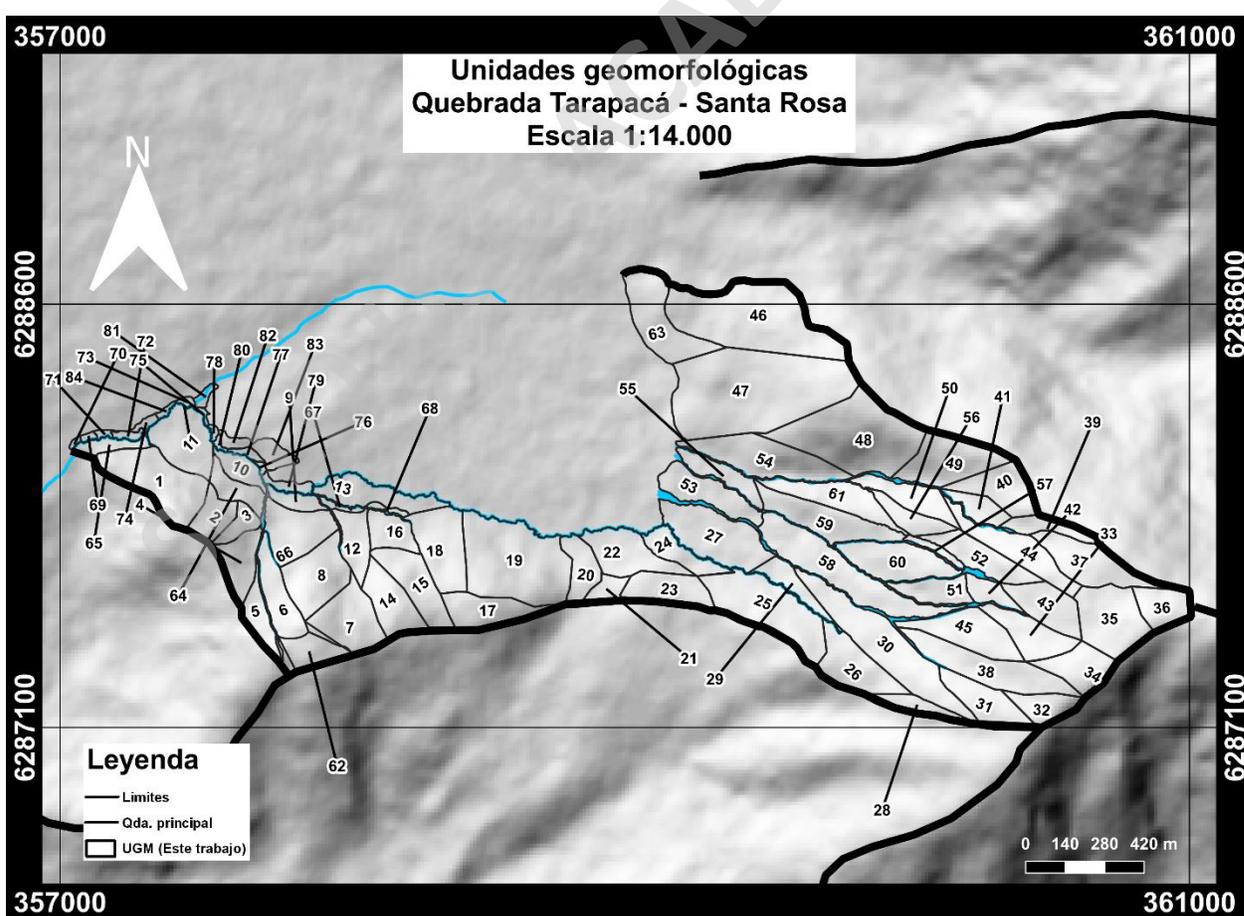


Figura 5.3: Unidades geomorfológicas finales (n=84) definidas por este trabajo en Quebrada Tarapacá – Santa Rosa.

Debido a que los estudios previos demuestran que la quebrada posee una susceptibilidad muy variable respecto a la generación de flujos en diferentes porciones de la hoya, se implementó un subtítulo que evidencia el impacto humano sobre laderas donde se haya magnificado la degradación de la unidad geomorfológica a nivel global con una descripción in situ, para finalmente combinar estas evidencias tanto dentro del cálculo de IS como de la definición final de unidades y así sustentar con evidencias de terreno los valores de susceptibilidad definidos por este estudio. Para una mejor ubicación de las unidades geomorfológicas, se incorporó al mapa de Celis (2018), una sectorización de las diferentes porciones de la cuenca hidrográfica (Figura 5.4). Para este trabajo se definen grados de susceptibilidad en base a la jerarquización local del Índice de Susceptibilidad propuesta por Lara (2007), donde cada descripción de los factores condicionantes se encuentra dentro del capítulo 3 subtítulo 8, mientras que las descripciones individuales de las unidades geomorfológicas respecto a las características estructurales de detalle se encuentran en el Anexo 2.

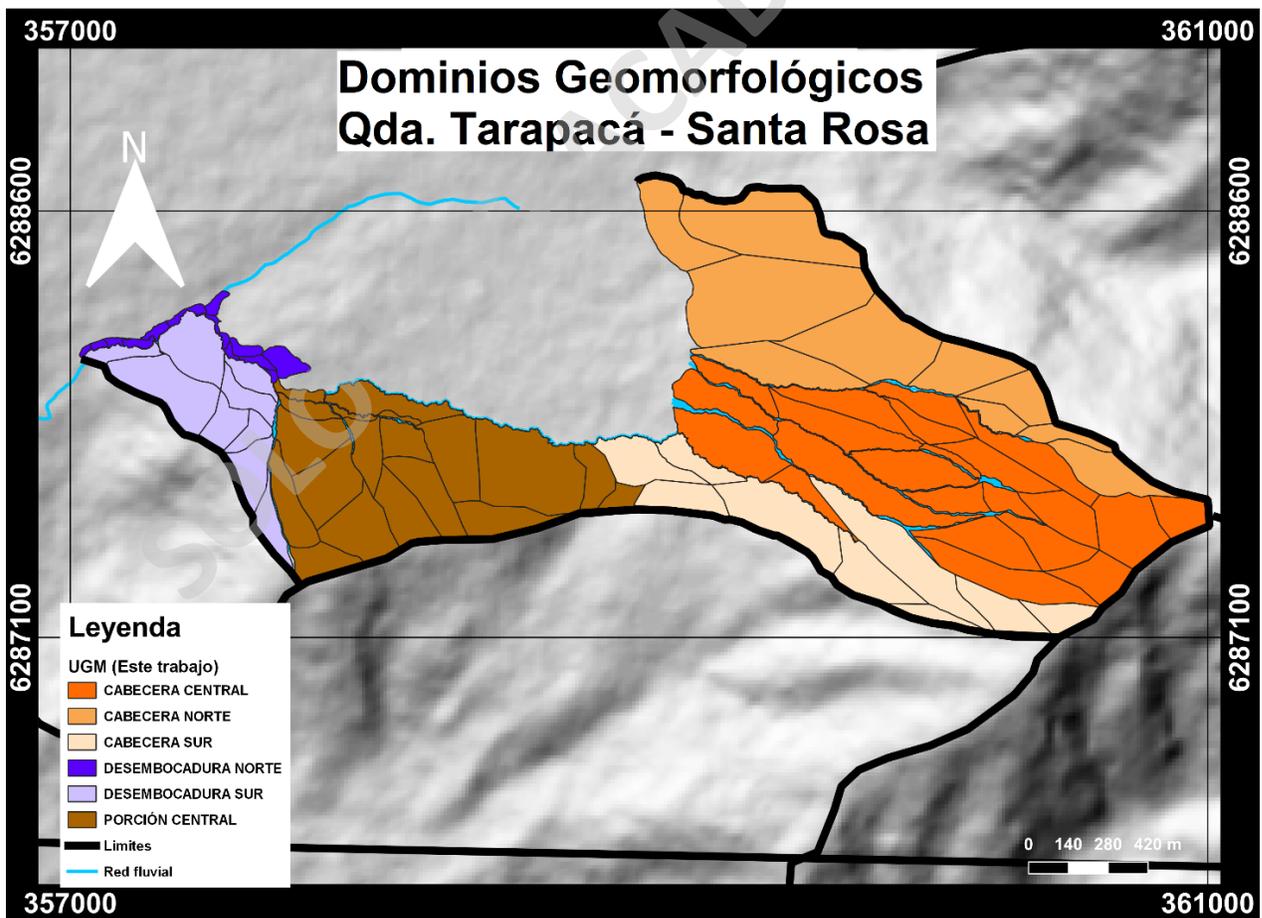


Figura 5.4: Dominios geomorfológicos propuestos para Quebrada Tarapacá – Santa Rosa, en base a exposición solar.

5.3 Cálculo de índices de susceptibilidad de flujos

A continuación, se presentan los mapas de susceptibilidad de remociones en masa tipo flujos para la Quebrada Tarapacá – Santa Rosa escala 1:14000, incluyendo la representación visual del cálculo de IS (presentes en el anexo 2 de este estudio) publicado por Lara (2007), y las 3 diferentes propuestas de cálculo por este trabajo. Cabe notar que se han incluido en el estudio de flujos de detritos aquellas unidades definidas como unidad de roca pero que presentan suelo superficial bien desarrollado (Estos casos corresponden a las unidades ubicadas principalmente en las cabeceras de la hoya hidrográfica). Celis (2018) establece que la susceptibilidad es crítica en 14 laderas.

5.3.1 Cálculo según Lara (2007)

Se han definido 84 nuevos IS para flujos de detritos en Quebrada Tarapacá – Santa Rosa, según la metodología propuesta por Lara (2007) y se ha generado un nuevo mapa de estudio (Figura 5.5).

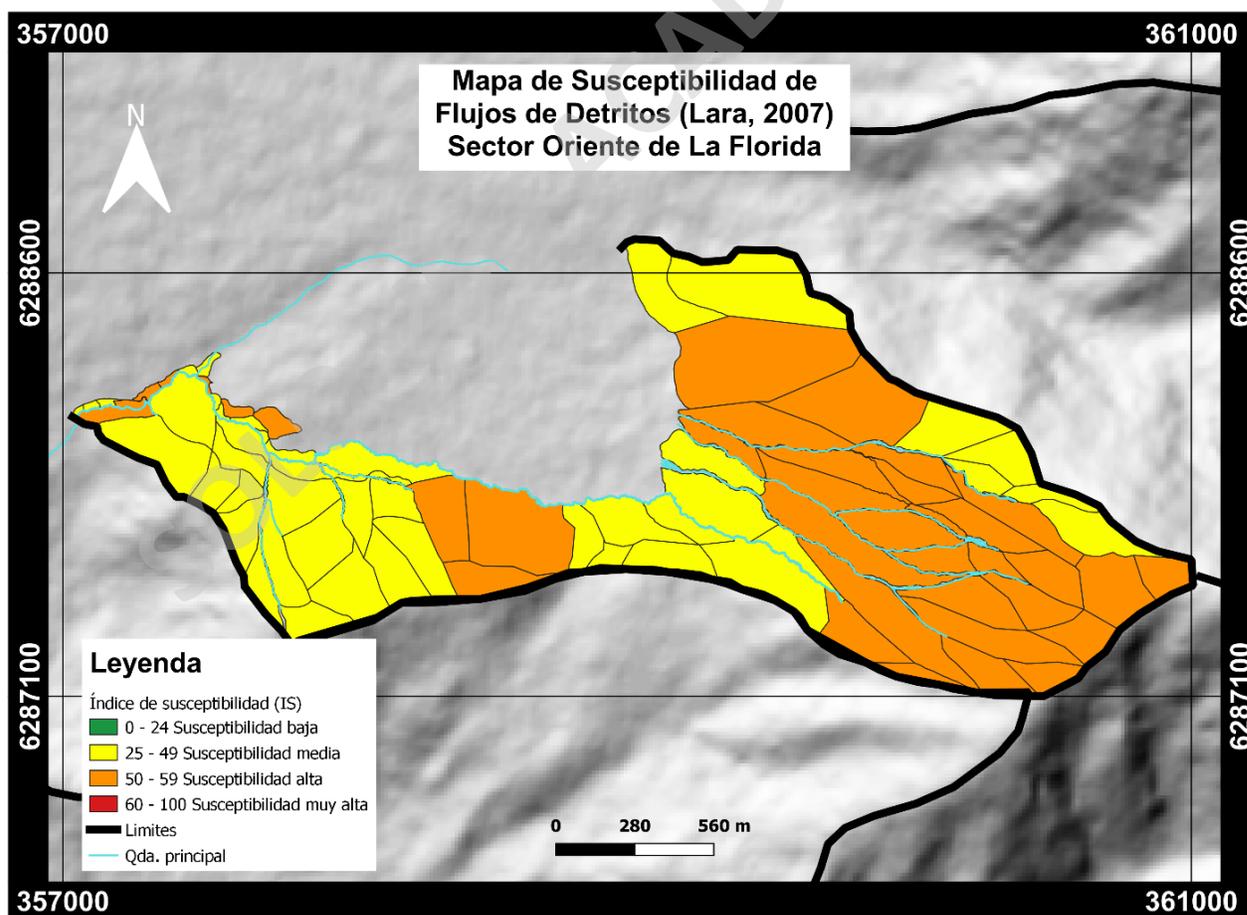


Figura 5.5: Mapa de susceptibilidad de flujos en base al cálculo de IS propuesto por Lara (2007)

Las unidades que presentan un IS mayor o igual que 50 para el estudio de flujos de detritos son exactamente 37 (Tabla 5.1), 23 unidades más respecto al trabajo de Celis (2018).

Tabla 5.1: Unidades geomorfológicas con índice de susceptibilidad alto y muy alto en base al cálculo de Lara (2007).

UGM	IS												
17	50	31	51	38	56	48	50	56	50	65	50	84	50
18	54	32	51	42	54	50	54	57	52	72	50		
19	54	33	56	43	58	51	50	58	54	74	53		
26	50	34	50	44	58	52	56	59	55	75	50		
28	50	35	50	45	56	54	52	60	56	82	50		
30	51	36	50	47	51	55	51	61	54	83	50		

Según la descripción de terreno y el puntaje posteriormente asociado, 26 de estas laderas se encuentran ubicadas en la cabecera de la hoya hidrográfica y todas corresponden a unidades definidas previamente en el trabajo de Celis (2018), mientras que las otras 11 unidades forman parte de la zona baja de la cuenca. Las laderas occidentales que presentan un índice alto corresponden en su totalidad a las nuevas unidades redefinidas por este estudio. Estas unidades fueron catalogadas por este trabajo como “unidades críticas” y fueron sometidas a estudios simples de laboratorio para la cuantificación de humedad y comparación contra laderas con índices bajos.

5.3.1.1 Unidades naturales y críticas

En total, se analizó una superficie de aproximadamente 2,581 km² (Tabla 5.2). Al momento de desglosar la caracterización de los puntajes en laderas críticas (Unidades de suelo con susceptibilidad alta y muy alta), es importante recordar que, dentro de esta metodología las condicionantes predominantes son la geomorfología, geología y geotecnia (Cohesión, plasticidad y humedad).

Tabla 5.2: Niveles de susceptibilidad de flujos por superficie de área (en km²), según el cálculo de Lara (2007).

Susceptibilidad	km ²	%
Baja	0	0
Media	1,228	47,58
Alta	1,353	52,42
Muy Alta	0	0
Superficie evaluada	2,581	100

Bajo la aplicación de la metodología de Lara (2007), el estudio arrojó que más de la mitad de la superficie estudiada presenta una probabilidad de desestabilización alta, y que no existen zonas con una susceptibilidad baja o muy alta. Esta es una de las primeras diferencias notorias respecto a la publicación de Lara et al. (2018) ya que, en ese estudio, la hoya fue caracterizada con zonas de susceptibilidad baja, media y alta. Esta desaparición de las laderas definidas con susceptibilidad baja no representa un problema, ya que es un error proveniente de las imágenes ráster y su escala. Siguiendo los factores predominantes de la metodología columnar, muchas de las laderas en la porción de desembocadura fueron caracterizadas previamente con una susceptibilidad baja en estudios como Lara y Sepúlveda (2010) y Celis (2018), esto quiere decir que los factores predominantes (Geomorfológico, geotécnico y geológico) fueron ponderados con el puntaje mínimo (Laderas entre los 10° a 20° ; cauces auxiliares con pendientes menores a 5° ; confinamientos bajos; espesores de suelo no críticos y por ende condiciones geotécnicas bajas principalmente). Bajo las actualizaciones de unidades de suelo en terreno y la confirmación de datos proveniente de las imágenes ráster de los escarpes principalmente, se notaron diferencias notables en los ángulos entregados, donde físicamente ninguna ladera presenta un ángulo menor a 15° . Esto quiere decir que es muy probable que, dentro de los estudios regionales, el factor de escala afecte a la resolución de las imágenes ráster y este subestime las pendientes de las unidades de ladera, afectando al puntaje de susceptibilidad debido a la predominancia del factor del escarpe. Las unidades críticas ubicadas en la porción de cabecera presentan un puntaje de susceptibilidad alto intrínsecamente relacionado con las características geomorfológicas, geológicas y geotécnicas de estas laderas. Los factores restantes suman directamente al promedio de la unidad, aumentando su IS. Estas unidades geomorfológicas se caracterizan por ser escarpadas (Laderas con pendientes sobre los 35°), tener cauces auxiliares con altas pendientes (Sobre los 30°) y confinamiento medio. Además, el sustrato presente sobre estas laderas presenta condiciones geotécnicas parcialmente favorables para la desestabilización, principalmente asociado a baja compacidad y una exposición solar alta. Es de notar que, en las porciones altas de la cuenca, el factor climático y antrópico no se presenta como un factor predominante.

Las laderas de la cabecera que no presentan un índice de susceptibilidad alto evidencian condiciones geomorfológicas similares (variación de pendiente de ladera sobre los 35° y de cauce sobre los 30° ; confinamiento medio), pero estas difieren en: la exposición solar; tener una buena cohesión; presentar condiciones no favorables a la desestabilización (exceptuando algunas laderas

con exposición sur o parcial que presentan condiciones geotécnicas alteradas por el factor antrópico); nula evidencia de concentración de nieve y estabilización por vegetación.

Dentro de las unidades más céntricas, los factores que predominan en el puntaje de las laderas más susceptibles son el geotécnico, el geomorfológico y el factor antrópico. Geomorfológicamente hablando estas laderas evidencian: pendientes variando entre los 15° a 30°; exposición solar variable; encausamientos bajos con pendiente de cauce variando entre los 10° a 15°.

Dentro de las laderas centrales se presenta la construcción de torres de alta tensión, en conjunto a aplanamiento del terreno, por lo que el puntaje en la descripción de desestabilización de las laderas asociadas a la intervención de los escarpes fue utilizado completamente (10 puntos).

El puntaje ligado a las condiciones geotécnicas del suelo corresponde a uno de carácter parcialmente favorable. El suelo de estas unidades fue caracterizado como depósitos con mala calidad geotécnica y favorables a ceder, es decir, sedimentos disgregados con menor cohesión respecto a laderas con orientación sur estabilizadas por la vegetación, los cuales además presentan fuerzas de tensión externas (producto de la construcción e infraestructura atingente a las ubicación de las torres de alta tensión) que pueden modificar la compacidad del terreno y las respuestas de desestabilización en estas laderas.

Respecto a las laderas críticas ubicadas en la desembocadura, todas corresponden a nuevas unidades definidas por este estudio y comparten la característica presentar intervención antrópica con diversos tipos de trazas humanas que modifican sustancialmente tanto el factor geomorfológico como el geotécnico, es decir, dentro de los índices de susceptibilidad de esta zona predominan ampliamente los factores previamente mencionados en conjunto a la ponderación del factor humano. Otro factor que otorga un peso a la ponderación es el factor de humedad, ya que las laderas descritas con orientación sur presentan en su mayoría un grado de saturación de agua, por lo que, bajo la comparación respecto a una ladera con orientación hacia el norte, la caracterización utilizada en estas laderas fue de saturada, sin embargo, unidades como la 54, 71 y 72 (que corresponden a laderas intervenidas antrópicamente o que presentan coberturas no naturales en la superficie del desarrollo de suelo) se les modificó el puntaje de humedad respecto a la escala de la traza humana, disminuyendo el factor desde saturada a una ladera no saturada.

Las unidades más naturales de la porción central presentan pendientes variando entre los 15 a 30° sin intervención humana, con una mejor calidad geotécnica respecto a la cohesión y compacidad

de los clastos, donde la vegetación se favorece por la nula intervención humana y estabiliza los depósitos más superficiales, a pesar de la exposición solar.

Las laderas que no presentan una condición de susceptibilidad alta en la zona baja de la cuenca se caracterizan por presentar: pendientes de entre los 15 a 30°; exposición solar norte; encausamiento bajo y pendientes de cause menores a 10°; ninguna traza humana de mediana escala y no presentar una condición saturada de humedad en estas. Las unidades más naturales de la porción central presentan pendientes variando entre los 15 a 30° sin intervención humana, con una mejor calidad geotécnica respecto a la cohesión y compacidad de los clastos de la cabecera, donde la vegetación se favorece por la nula intervención humana y estabiliza los depósitos más superficiales, a pesar de la exposición solar y la escorrentía esporádica.

5.3.1.2 Resultados de laboratorio de unidades críticas y naturales.

A grandes rasgos, el trabajo de laboratorio incorpora una caracterización geotécnica simple de humedad y granulometría, la cual es comparada con información de datos ráster y datos de terreno publicados del área. Se realizaron ensayos en 4 laderas por porción dentro de la cuenca, tratando de incorporar los datos de laderas naturales y críticas con exposición solar tanto norte como sur.

Las 24 laderas muestreadas se encuentran descritas y desglosadas en la tabla 5.3, con los parámetros geotécnicos respectivos. El análisis de laboratorio y la metodología de actividades se encuentra ubicada en el Anexo 3

Los resultados de los ensayos de ladera para unidades críticas y naturales (Tabla 5.3) fueron desglosados en base a las diferentes características que competen la modificación del contenido de humedad y saturación de una unidad geomorfológica. Dentro de los parámetros a contrastar que presentan las muestras se encuentran: la ubicación respecto a la porción en la cuenca; la exposición solar de la ladera; el tipo de intervención antrópica (categorizada y simplificada como proceso de cobertura o exposición). La integración de estos datos puede dar a correlaciones preliminares respecto a la condición de estabilidad de la cuenca, interpolando los datos de humedad hacia imágenes vectoriales para la comparación visual respecto a la diversidad de trazas mapeadas.

También se presentan los porcentajes granulométricos de la cuenca, con los cuales se analizará la correlación entre el factor de humedad y exposición solar de las diferentes unidades geomorfológicas.

Tabla 5.3: Interpolación de características, cálculo de contenido de humedad y resultados de granulometría.

U G M	Porción	Exposición	Intervención antrópica	Granulometría (Matriz)	Peso de muestra húmeda	Peso de muestra seca	Contenido de humedad
74	Desembocadura norte	Sur	Cobertura	70% arena muy fina o menor	100 gr	87,25 gr	12,75%
72	Desembocadura norte	Sur	Exposición	70% arena muy fina o menor	100 gr	87,70 gr	12,30%
76	Desembocadura norte	Sur	Nula	70% arena muy fina o menor	100 gr	87,66 gr	12,44%
10	Desembocadura sur	Norte	Cobertura	60% arena muy fina o menor	100 gr	90,25 gr	9,85%
65	Desembocadura sur	Norte	Exposición	60% arena muy fina o menor	100 gr	90,40 gr	9,60%
1	Desembocadura sur	Norte	Nula	60% arena muy fina o menor	100 gr	90,22 gr	9,78%
18	Porción central	Norte	Cobertura	65% arena muy fina o menor	100 gr	90,02 gr	9,98%
17	Porción central	Norte	Exposición	65% arena muy fina o menor	100 gr	90,34 gr	9,66%
14	Porción central	Norte	Nula	65% arena muy fina o menor	100 gr	90,16 gr	9,84%
21	Cabecera norte	Sur	Cobertura	75% arena muy fina o menor	100 gr	86,29 gr	13,71%
20	Cabecera norte	Sur	Exposición	75% arena muy fina o menor	100 gr	86,57 gr	13,43%
23	Cabecera norte	Sur	Nula	75% arena muy fina o menor	100 gr	86,48 gr	13,52 %
55	Cabecera central	Parcial	Cobertura	70% arena muy fina o menor	100 gr	86,38 gr	13,62%
59	Cabecera central	Parcial	Exposición	70% arena muy fina o menor	100 gr	86,80 gr	13,20%
58	Cabecera central	Parcial	Nula	70% arena muy fina o menor	100 gr	86,75 gr	13,25%
47	Cabecera Sur	Norte	Cobertura	65% arena muy fina o menor	100 gr	89,48 gr	10,52%
54	Cabecera Sur	Norte	Exposición	65% arena muy fina o menor	100 gr	90,02 gr	9,98%
48	Cabecera Sur	Norte	Nula	65% arena muy fina o menor	100 gr	89,68 gr	10,32%

5.3.2 Cálculos reponderados según este trabajo

Este subtítulo expone los nuevos IS obtenidos y los nuevos mapas de flujos, resultantes de las reformulaciones propuestas por este trabajo a la metodología de Lara (2007) (Fórmula A, B y C).

5.2.2.1 Fórmula A

Se han definido 84 índices de susceptibilidad inéditos para flujos de detritos en Quebrada Tarapacá – Santa Rosa (según la fórmula A propuesta por este estudio) y se ha generado un nuevo mapa de estudio (Figura 5.6).

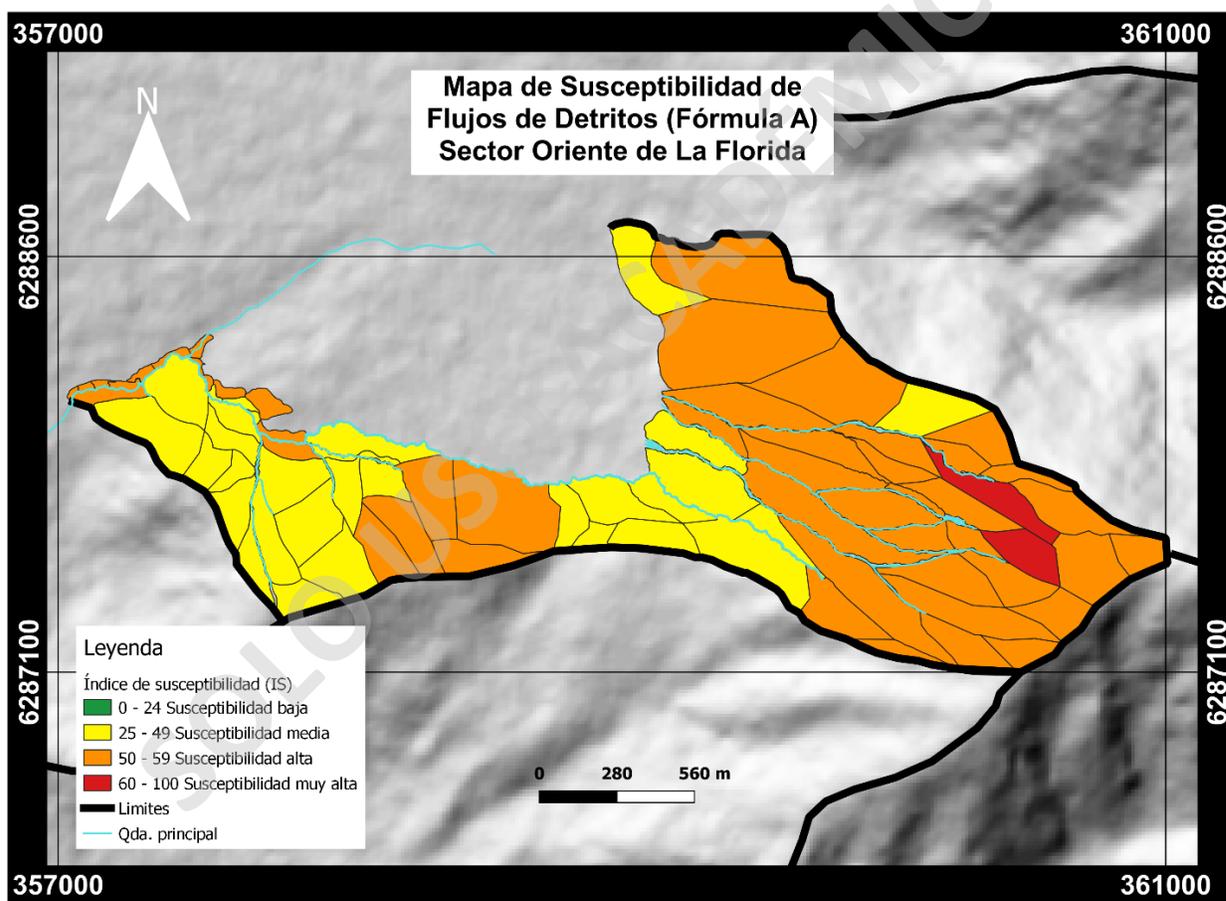


Figura 5.6: Mapa de susceptibilidad de flujos en base al cálculo de IS propuesto por la formulación A.

Las unidades que presentan un IS mayor o igual que 50 para el estudio de flujos son exactamente 52 (Tabla 5.4), 38 unidades más respecto al trabajo de Celis (2018) y 15 más respecto a los índices calculados con la propuesta de Lara (2007).

Tabla 5.4: Unidades geomorfológicas con índice de susceptibilidad alto y muy alto en base al cálculo A.

UGM	IS												
9	50	30	51	38	58	46	51	56	54	70	51	81	51
14	50	31	51	39	50	47	55	57	55	71	51	82	55
15	50	32	51	40	50	48	54	58	57	72	55	83	55
17	55	33	56	41	51	50	57	59	59	73	53	84	55
18	59	34	50	42	56	51	52	60	59	74	58		
19	59	35	50	43	60	52	58	61	58	75	55		
26	53	36	50	44	60	54	55	65	55	78	50		
28	51	37	50	45	58	55	54	69	51	79	50		

Según la descripción de terreno y el puntaje posteriormente asociado, 15 de estas laderas obtuvieron un IS mayor a 50 en la formulación preliminar de Lara (2007) (Subtítulo 5.3.1). Además, 31 unidades se encuentran ubicadas en la cabecera de la hoya hidrográfica y todas corresponden a unidades definidas previamente en el trabajo de Celis (2018), mientras que las otras 21 unidades forman parte de la zona baja de la cuenca. Las laderas occidentales que presentan un índice alto corresponden en su totalidad a las nuevas unidades redefinidas por este estudio.

5.3.1.1 Unidades críticas

Celis (2018) establece que la susceptibilidad es crítica en 14 laderas, mientras que los resultados de terreno arrojaron que, dentro de las 84 laderas en estudio, al menos 52 laderas fueron caracterizadas como críticas, según el cálculo de IS propuesto para la fórmula A. En total, se analizó una superficie de aproximadamente 2,581 km² (Tabla 5.5).

Tabla 5.5: Niveles de susceptibilidad de flujos por superficie de área (en km²), según el cálculo A.

Susceptibilidad	km ²	%
Baja	0	0
Media	0,887	34,37
Alta	1,62	62,76
Muy Alta	0,074	2,87
Superficie evaluada	2,581	100

Bajo la aplicación de la reformulación A, el estudio arrojó que más de la mitad de la superficie caracterizada presenta una probabilidad de desestabilización alta (aproximadamente en un 63%), que no existen zonas con una susceptibilidad baja y que se calcularon índices de susceptibilidad

muy alto. Esta es una de las primeras diferencias notorias respecto al cálculo local de IS realizado previamente con la metodología de Lara (2007), donde la reformulación caracteriza a la hoya con zonas de susceptibilidad media y alta solamente, con un número de unidades más equilibrado porcentualmente respecto a la distribución en área (48 y 52% respectivamente). Es de notar que la aplicación de las reformulaciones incorpora no solo una modificación conceptual de factores, sino también incorporan nuevos factores que pueden influir en estas heterogeneidades, como la aplicación del factor de distancia de las unidades geomorfológicas respecto a zona de falla. Además, todas las unidades con un IS mayor a 50 calculado desde la metodología original mantuvieron sus índices o aumentaron, pero no disminuyeron bajo el límite de los rangos altos.

Las unidades críticas ubicadas en la porción de cabecera presentan un puntaje de susceptibilidad alto intrínsecamente relacionado con las características geomorfológicas, geológicas y geotécnicas de estas laderas, donde se incorporan (respecto al primer cálculo de IS realizado por esta metodología) laderas con índices modificados desde susceptibilidad media hacia una susceptibilidad alta de la cabecera norte y central. Los factores restantes suman directamente al promedio de la unidad, aumentando su IS hasta el punto de obtener laderas con IS muy alto (unidad geomorfológica número 43 y 44). Estas unidades geomorfológicas se caracterizan por ser escarpadas (Laderas con pendientes sobre los 35°), tener cauces auxiliares con altas pendientes (Sobre los 30°) y confinamiento medio. Además, el sustrato presente sobre estas laderas presenta condiciones geotécnicas parcialmente favorables para la desestabilización, principalmente asociado a baja compacidad y una exposición solar alta, con una distancia menor a 500 metros respecto a la traza de la Falla de San Ramón (distancia asociada al máximo puntaje de este factor). Las laderas de la cabecera que no presentan un índice de susceptibilidad alto evidencian condiciones geomorfológicas similares (variación de pendiente de ladera sobre los 35° y de cauce sobre los 30° ; confinamiento medio), pero estas difieren principalmente en la cohesión del sustrato y por presentar condiciones no favorables a la desestabilización por ser laderas con alta vegetación. Además, producto de la elongación heterogénea de la geomorfología de la cuenca, algunas unidades geomorfológicas se encuentran más alejadas de la traza oriental de la Falla, disminuyendo el puntaje de IS calculado.

Dentro de las laderas centrales críticas de la cuenca, estas están caracterizadas por presentar la construcción de torres de alta tensión en conjunto a aplanamiento del terreno, por lo que el puntaje en la descripción de desestabilización de las laderas asociadas a la estabilidad geotécnica e

intervención de los escarpes fue utilizado completamente, provocando un aumento en la ponderación. Dentro de estas unidades además se evidencian 2 laderas adicionales que aumentaron su IS por la ponderación del factor antrópico y ubicación de trazas en la estratigrafía.

El puntaje ligado a las condiciones geotécnicas del suelo corresponde a uno de carácter parcialmente favorable, pero las condiciones globales del sustrato son poco favorables para la desestabilización. El suelo de estas unidades céntricas fue caracterizado como un depósito con mala calidad geotécnica y favorables a ceder, es decir, sedimentos disgregados con menor cohesión respecto a laderas con orientación sur estabilizadas por la vegetación, los cuales además presentan fuerzas de tensión externas (producto de la construcción e infraestructura atingente a las ubicación de las torres de alta tensión) que pueden modificar la compacidad del terreno y las respuestas de desestabilización en estas laderas. Las unidades más naturales de la porción central presentan pendientes variando entre los 15 a 30° sin intervención humana, con una mejor calidad geotécnica respecto a la cohesión y compacidad de los clastos de la cabecera, donde la vegetación se favorece por la nula intervención humana y estabiliza los depósitos más superficiales, a pesar de la exposición solar y la escorrentía esporádica.

Respecto a las laderas críticas ubicadas en la desembocadura, todas corresponden a nuevas unidades definidas por este estudio y comparten la característica de presentar intervención antrópica con diversos tipos de trazas humanas que modifican sustancialmente tanto el factor geomorfológico como geotécnico de la ladera, es decir, dentro de los índices de susceptibilidad de esta zona predominan ampliamente los factores previamente mencionados en conjunto a la ponderación del factor humano. El número de laderas con IS alto en esta porción aumenta considerablemente al momento de aplicar la reformulación, donde la reordenación de factores geológicos y geotécnicos (factor de humedad y factor de cercanía a zona de falla) amplifica algunos cálculos en la zona baja de la hoya.

Las laderas que no presentan una condición de susceptibilidad alta en la zona baja de la cuenca se caracterizan por presentar: pendientes de entre los 15 a 30°; exposición solar norte; encausamiento bajo y pendientes de cause menores a 10° y ninguna traza humana de mediana o pequeña escala.

5.2.2.2 Fórmula B

Se han definido 84 IS inéditos para flujos de detritos en Quebrada Tarapacá – Santa Rosa según la fórmula B propuesta por este estudio y se generó un nuevo mapa de estudio (Figura 5.7).

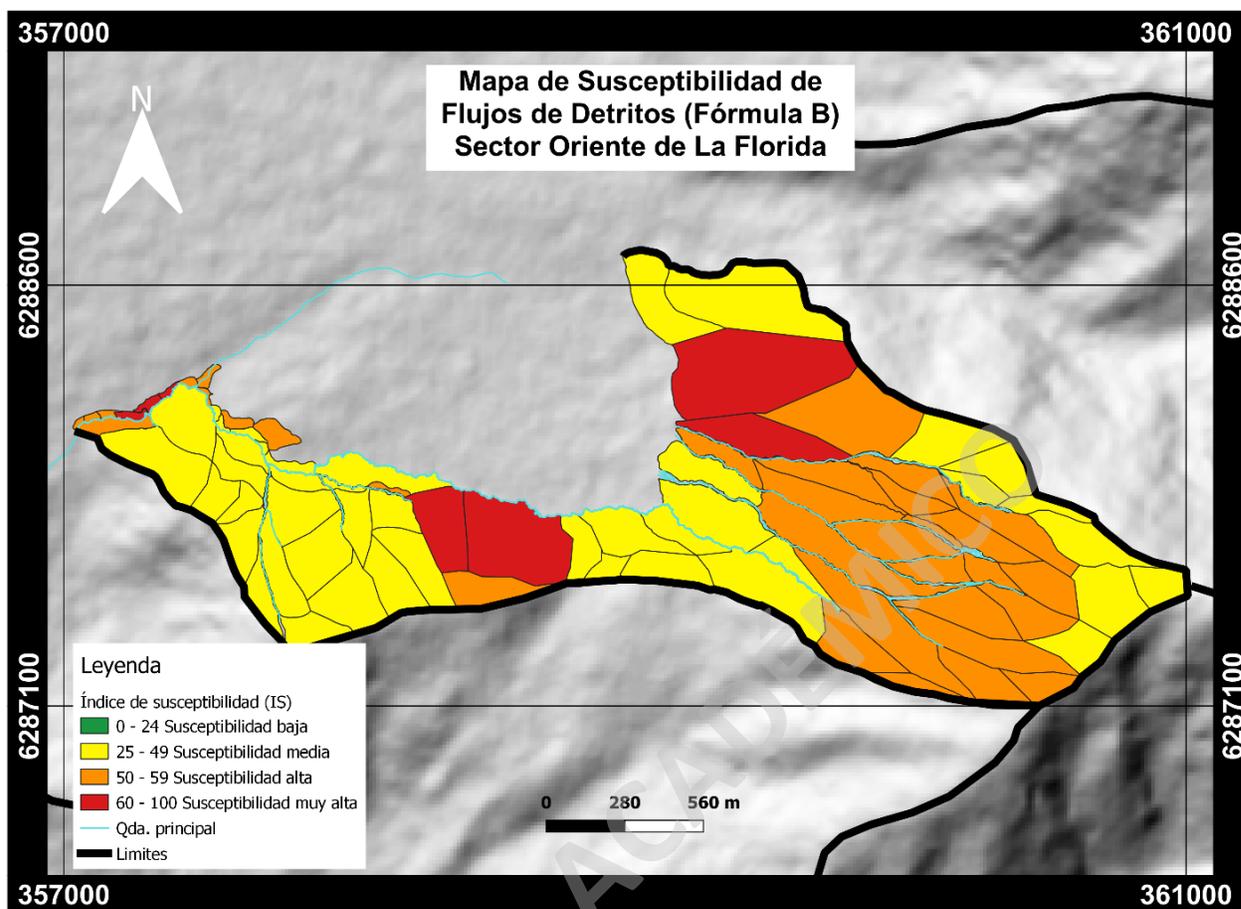


Figura 5.7: Mapa de susceptibilidad de flujos en base al cálculo de IS propuesto por la formulación B.

Las unidades que presentan un IS mayor o igual que 50 para el estudio de flujos son exactamente 40 (Tabla 5.6), 26 unidades más respecto al trabajo de Celis (2018), 3 más respecto a los índices calculados con la propuesta de Lara (2007) y 12 menos respecto a las unidades con la fórmula A.

Tabla 5.6: Unidades geomorfológicas con índice de susceptibilidad alto y muy alto en base al cálculo B.

UGM	IS	UGM	IS	UGM	IS	UGM	IS
17	56	42	53	55	57	70	55
18	60	43	57	56	50	71	53
19	60	44	57	57	54	72	59
26	50	45	55	58	54	73	50
28	50	47	59	59	58	74	62
30	51	48	58	60	56	75	57
31	50	50	53	61	55	81	52
32	50	51	50	65	56	82	55
33	54	52	54	68	53	83	57
38	55	54	60	69	55	84	59

5.3.1.1 Unidades críticas

Celis (2018) establece que la susceptibilidad es crítica en 14 laderas, mientras que los resultados de terreno arrojaron que, dentro de las 84 laderas en estudio, al menos 40 laderas fueron caracterizadas como críticas, según el cálculo de IS propuesto para la fórmula B. En total, se analizó una superficie de aproximadamente 2,581 km² (Tabla 5.7).

Tabla 5.7: Niveles de susceptibilidad de flujos por superficie de área (en km²), según el cálculo B.

Susceptibilidad	km²	%
Baja	0	0
Media	0,912	35,33
Alta	1,301	50,40
Muy Alta	0,368	14,27
Superficie evaluada	2,581	100

Bajo la aplicación de la reformulación B, el estudio arrojó que la mitad de la superficie caracterizada presenta una probabilidad de desestabilización alta (aproximadamente en un 50%), que no existen zonas con una susceptibilidad baja y que se calcularon índices de susceptibilidad medio y muy alto. Una de las primeras diferencias notorias respecto a los cálculos anteriores es la aparición de un número considerable de unidades definidas con susceptibilidad muy alta, pasando el 14%. Es de notar que la aplicación de las reformulaciones incorpora no solo una modificación conceptual de factores, sino también incorporan nuevos factores que pueden influir en estas heterogeneidades, como la aplicación del factor de distancia de las unidades geomorfológicas respecto a zona de falla. Se recuerda que la formulación B incorpora un alza al factor geotécnico-geológico y al factor antrópica, de mayor rango que las formulaciones adicionales de este trabajo. Además, todas las unidades con un IS mayor a 50 calculado desde la metodología original mantuvieron sus índices o aumentaron, pero no disminuyeron bajo el límite de los rangos altos.

Dentro de las unidades críticas, todas las unidades definidas con IS alto en el primer cálculo fueron recalculadas con un IS alto respecto a la formulación B, manteniendo una congruencia preliminar. Las unidades críticas ubicadas en la porción de cabecera presentan un puntaje de susceptibilidad alto intrínsecamente relacionado con las características geomorfológicas, geológicas y geotécnicas de estas laderas al igual que en las formulaciones anteriores, donde se incorporan (respecto al primer y segundo cálculo de IS realizado por esta metodología) laderas con índices modificados desde susceptibilidad media en partes de la cabecera norte y la porción occidental de la cabecera

sur, hacia una susceptibilidad alta en la porción central y porción oriental de la cabecera sur. Los factores restantes suman directamente al promedio de las unidades de susceptibilidad muy altas, aumentando su IS hasta el punto de obtener laderas con IS inéditos (unidad geomorfológica número 47 y 54). Estas unidades geomorfológicas se caracterizan por ser escarpadas (Laderas con pendientes sobre los 35°), tener cauces auxiliares con altas pendientes (Sobre los 30°) y confinamiento medio. Además, el sustrato presente sobre estas laderas presenta condiciones geotécnicas parcialmente favorables para la desestabilización, principalmente asociado a baja compacidad y una exposición solar alta, con una distancia menor a 500 metros respecto a la traza de la Falla de San Ramón (distancia asociada al máximo puntaje de este factor) y una alta actividad antrópica.

Las laderas de la cabecera que no presentan un índice de susceptibilidad alto evidencian condiciones geomorfológicas similares (variación de pendiente de ladera sobre los 35° y de cauce sobre los 30°; confinamiento medio).

Dentro de las laderas centrales críticas de la cuenca se repiten las unidades que están caracterizadas por presentar la construcción de torres de alta tensión en conjunto a aplanamiento del terreno, donde además se repite la utilización del puntaje máximo del factor antrópico en las unidades 17,18 y 19, siendo estas últimas catalogadas como unidades con una susceptibilidad muy alta a la desestabilización. Otra de las evidencias más aisladas del mapa en las porciones centrales, es la reaparición de unidades caracterizadas con un impacto antrópico leve y que no fueron definidas con susceptibilidad alta previamente, tal y como las laderas 67, 79,83 y 68 (la cual solo mantiene su puntaje en la formulación C).

Respecto a las laderas críticas ubicadas en la desembocadura, todas corresponden a nuevas unidades definidas por este estudio y comparten la característica de presentar intervención antrópica alta o muy alta, es decir, dentro de los índices de susceptibilidad de esta zona predominan ampliamente los factores previamente mencionados en conjunto a la ponderación del factor humano, manteniendo la aparición y caracterización de las laderas que ya fueron definidas así.

El puntaje ligado a las condiciones geotécnicas del suelo corresponde a uno de carácter parcialmente favorable, dadas las condiciones globales del sustrato favorables para la desestabilización por el impacto humano. El suelo de estas unidades críticas ubicadas en la desembocadura sur fue caracterizado como un depósito con mala calidad geotécnica y favorables a ceder, es decir, sedimentos disgregados con menor cohesión respecto a laderas con orientación

sur estabilizadas por la vegetación, los cuales además presentan fuerzas de tensión externas (producto de la construcción e infraestructura atingente a las ubicación de las contenciones aluvionales que modifican las condiciones geomorfológicas y geotécnicas) que pueden modificar la compacidad del terreno y las respuestas de desestabilización en estas laderas. Las unidades más naturales de la porción baja presentan pendientes variando entre los 15 a 20° sin intervención humana, con una mejor calidad geotécnica respecto a la cohesión y compacidad de los clastos de la porción central, donde la vegetación se favorece por la nula intervención humana y estabiliza los depósitos más superficiales, apoyado por la exposición solar y la escorrentía esporádica.

5.2.2.3 Fórmula C

Se han definido 84 IS inéditos para flujos de detritos en Quebrada Tarapacá – Santa Rosa según la fórmula C propuesta por este estudio y se generó un nuevo mapa de estudio (Figura 5.8).

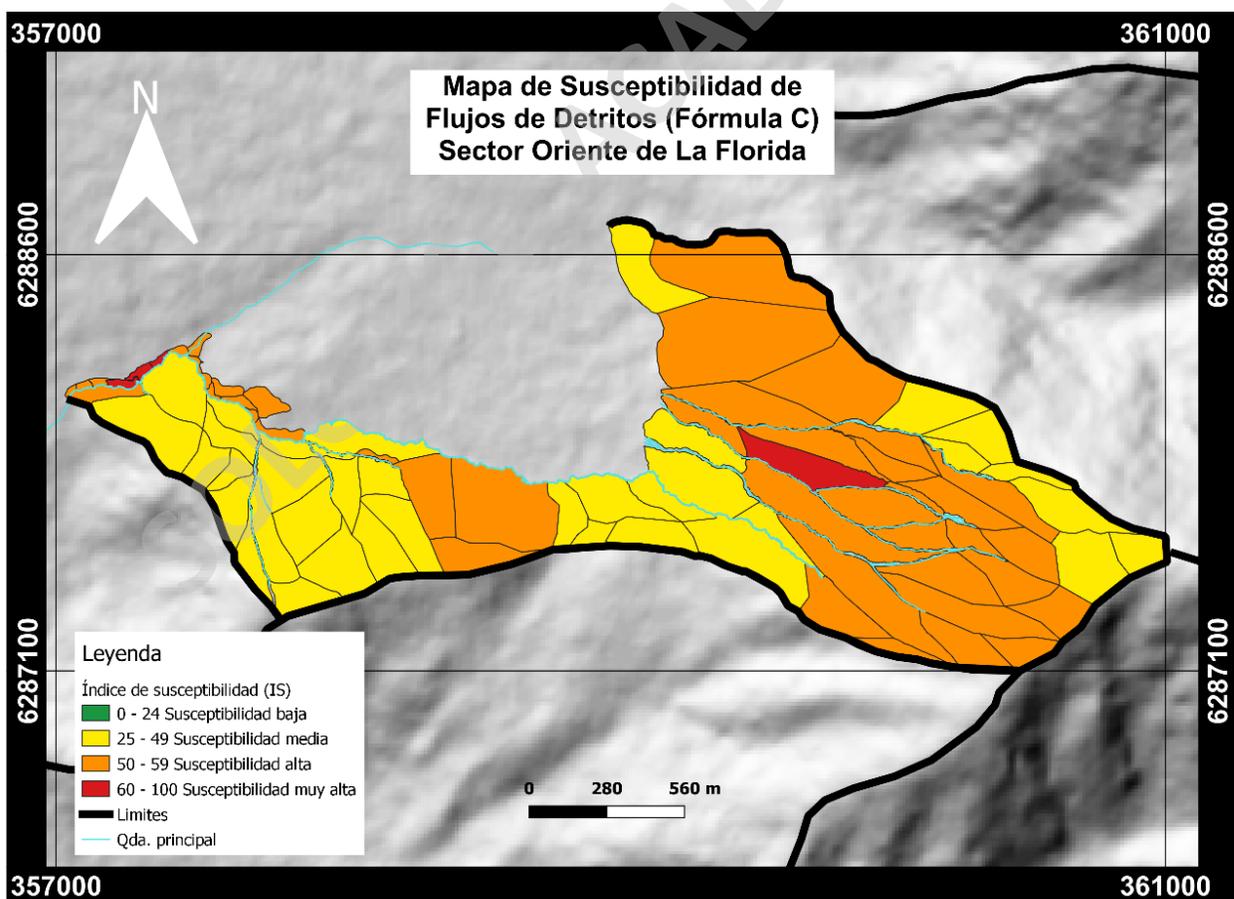


Figura 5.8: Mapa de susceptibilidad de flujos en base al cálculo de IS propuesto por la formulación C.

Las unidades que presentan un IS mayor o igual que 50 para el estudio de flujos son exactamente 47 (Tabla 5.8), 33 unidades más respecto al trabajo de Celis (2018), 10 más respecto a los índices calculados con la propuesta de Lara (2007), 5 menos que las unidades con la fórmula A y 7 más respecto a las laderas calculadas con la reponderación B.

Tabla 5.8: Unidades geomorfológicas con índice de susceptibilidad alto y muy alto en base al cálculo C.

UGM	IS								
17	50	42	54	55	55	71	55	82	57
18	54	43	58	56	53	72	60	83	57
19	54	44	58	57	57	73	57	84	60
26	53	45	56	58	57	74	62		
28	53	46	52	59	63	75	59		
30	54	47	59	60	58	76	51		
31	52	48	58	61	59	77	51		
32	52	50	56	65	55	78	54		
33	56	51	53	68	53	79	54		
34	50	52	56	69	55	80	51		
38	56	54	59	70	55	81	50		

5.3.1.1 Unidades críticas

Celis (2018) establece que la susceptibilidad es crítica en 14 laderas, mientras que los resultados de terreno arrojaron que, dentro de las 84 laderas en estudio, al menos 47 laderas fueron caracterizadas como críticas, según el cálculo de IS propuesto por la formulación. En total, se analizó una superficie de aproximadamente 2,581 km² (Tabla 5.9).

Tabla 5.9: Niveles de susceptibilidad de flujos por superficie de área (en km²), según el cálculo C.

Susceptibilidad	km ²	%
Baja	0	0
Media	1,126	43,62
Alta	1,402	54,32
Muy Alta	0,053	2,06
Superficie evaluada	2,581	100

Bajo la aplicación de la reformulación C, el estudio arrojó que más mitad de la superficie caracterizada presenta una probabilidad de desestabilización alta (aproximadamente en un 54%), que no existen zonas con una susceptibilidad baja y que se calcularon índices de susceptibilidad

medio y muy alto, esta última en las menores proporciones entre las 3 reformulaciones. Es de notar que la aplicación de esta reformulación incorpora la aplicación del factor de distancia de las unidades geomorfológicas respecto a zona de falla y la descripción geotécnica como factor predominante en este caso. Se recuerda que la formulación C incorpora un alza al factor geotécnico-geológico, mantiene el factor antrópico y anula el factor de vegetación y su respectiva ponderación presente en las formulaciones. Además, nuevamente todas las unidades con un IS mayor a 50 calculado desde la metodología original mantuvieron sus índices o aumentaron, pero no disminuyeron bajo el límite de los rangos altos, generando un equilibrio global de la subestimación. Las unidades críticas ubicadas en la porción de cabecera presentan un puntaje de susceptibilidad alto intrínsecamente relacionado con las características geomorfológicas, geológicas y geotécnicas de estas laderas al igual que en las formulaciones anteriores, donde se incorporan (respecto al primer, segundo y tercer cálculo de IS realizado por esta metodología) laderas con índices modificados desde susceptibilidad media en más de la mitad de la cabecera norte oriental y la porción occidental de la cabecera sur, hacia una susceptibilidad alta en la porción central y porción oriental de la cabecera sur. Los factores restantes suman directamente al promedio de las unidades de susceptibilidad muy altas, aumentando su IS hasta el punto de obtener laderas con IS inéditos (unidad geomorfológica número 59, 76, 77 y 78). Estas unidades geomorfológicas se caracterizan por ser escarpadas (Laderas con pendientes sobre los 35°), tener cauces auxiliares con altas pendientes (Sobre los 30°) y confinamiento medio. Además, el sustrato presente sobre estas laderas presenta condiciones geotécnicas parcialmente favorables para la desestabilización, principalmente asociado a baja compacidad y una exposición solar alta, con una distancia menor a 500 metros respecto a la traza de la Falla de San Ramón (distancia asociada al máximo puntaje de este factor y que dentro de la formulación presenta el doble de puntaje respecto a las otras propuestas) y una alta actividad antrópica.

Las laderas de la cabecera que no presentan un índice de susceptibilidad alto evidencian condiciones geomorfológicas similares (variación de pendiente de ladera sobre los 35° y de cauce sobre los 30°; confinamiento medio), donde a pesar de la cercanía a las zonas de falla, se presentan con un IS medio. A pesar de que el factor de vegetación sea nulo, la ponderación y descripción geotécnica y geológica incorpora en cierta medida a la caracterización del volumen de flora sobre las unidades.

Dentro de las laderas centrales críticas de la cuenca se repiten las unidades que están caracterizadas por presentar la construcción de torres de alta tensión en conjunto a aplanamiento del terreno respecto a la formulación B.

Respecto a las laderas críticas ubicadas en la desembocadura, todas corresponden a nuevas unidades definidas por este estudio manteniendo así un equilibrio en la sobreestimación del cálculo de unidades entre las 3 fórmulas.

El puntaje ligado a las condiciones geotécnicas del suelo corresponde a uno de carácter parcialmente favorable, dadas las condiciones por la desestabilización por el impacto humano. El suelo de estas unidades críticas ubicadas en la desembocadura norte fue asociándose con un IS alto y muy alto compartido por todas las reformulaciones, como depósitos con mala calidad geotécnica y favorables a ceder, los cuales además presentan fuerzas de tensión externas (producto de la construcción e infraestructura atingente a las ubicación de las contenciones aluvionales que modifican las condiciones geomorfológicas y geotécnicas).

5.4 Composición estadística de Mapas

La base de datos del cálculo de IS para las 4 fórmulas entrega valores no muy lejanos entre sí respecto a la media y la mediana. Estos valores son importantes de analizar ya que en la mayoría de las ocasiones resulta más eficaz condensar la información que entregan estos índices respecto a las diferentes características de construcción de las fórmulas, de forma resumida y numérica.

Tal y como se aprecia en la tabla 5.10, la formulación columnar presenta los menores valores de media y mediana respecto al cálculo de índice de susceptibilidad. En su contraparte, la fórmula A puede definirse como una formulación con una media sobre los 50 puntos de IS.

Debido a la distribución de las frecuencias de los datos y gracias a las diferentes propiedades asociadas a estas, se debe utilizar solo un parámetro de tendencia central para la descripción global de las reformulaciones. Las otras 2 formulaciones restantes este estudio se encasillan en el rango definido para una susceptibilidad media y alta respectivamente, remarcado visualmente en la generalidad de los mapas, indicando zonas con una media y alta susceptibilidad de desestabilización de la unidad geomorfológica como norma general

Respecto a la dispersión de los datos y el coeficiente de simetría, este parámetro es el mejor indicador respecto a la definición de las medidas de tendencia central. Simetrías negativas o

positivas pueden indicar si es que la mediana o la moda es el parámetro más representativo de la muestra en cuestión. En este caso en particular, todas las fórmulas presentan una asimetría leve y negativa, con valores inclusive alcanzando una concentración mucho más centralizada y simétrica. Este leve error puede contemplar una concentración de datos heterogénea, por lo que, en base a la correlación del coeficiente de asimetría se puede definir que la fórmula B no es simétrica, ya que prácticamente la distribución está descentralizada por las unidades definidas con IS entre 30 y 60%. Al momento de comparar medias y medianas, se puede observar que la media calculada es menor a la mediana producido probablemente por el efecto de asimetría de la distribución de los datos, exceptuando la reformulación B. Por esta razón, preliminarmente se puede seleccionar a la mediana como la medida de tendencia central más correcta para la condensación de información de las diferentes reformulaciones propuestas.

Tabla 5.10: Estadística y exploración descriptiva de la base de datos respectiva al cálculo de IS en este estudio.

Estadística de IS, Lara (2007)		Estadística de IS, formulación A		Estadística de IS, formulación B		Estadística de IS, formulación C	
Media	46,714	Media	50,714	Media	49,452	Media	50,928
Error típico	0,655	Error típico	0,590	Error típico	0,768	Error típico	0,647
Mediana	47	Mediana	51	Mediana	49	Mediana	51
Moda	50	Moda	55	Moda	55	Moda	48
Desviación estándar	6,011	Desviación estándar	5,407	Desviación estándar	7,034	Desviación estándar	5,933
Coefficiente de asimetría	-0,135	Coefficiente de asimetría	-0,204	Coefficiente de asimetría	-0,082	Coefficiente de asimetría	-0,188
Rango	23	Rango	20	Rango	26	Rango	24
Mínimo	35	Mínimo	40	Mínimo	36	Mínimo	39
Máximo	58	Máximo	60	Máximo	62	Máximo	63

Dentro la formulación A se ha de recordar que la ponderación de los factores condicionantes fue redistribuida de una forma equitativa, generando que el factor geológico-geotécnico y el factor antrópico pasasen a tener la jerarquía secundaria de la formulación (siendo el factor geomorfológico como la condicionante que prima dentro del cálculo de IS). La propuesta en sí altera a la formulación columnar y beneficia mucho más la predominancia del factor antrópico dentro del cálculo, donde claramente aumenta el índice de susceptibilidad, pero exhibe una mediana de solo 4 puntos más alta. Tanto la formulación B y C mantienen la jerarquía primaria

entre el factor geomorfológico y el factor geológico-geotécnico, donde se aprecia también un aumento de la mediana respecto a la ponderación columnar.

Este bajo porcentaje con al menos un 4 puntos de sobreestimación del cambio entre la formulación columnar y las demás propuestas sugieren reponderaciones estables y sin máximos ni mínimos anómalos, pero evidencian un sobrestimación mínima que deforma la distribución de los datos por el aumento en la jerarquía del factor antrópico dentro de los porcentajes en las 3 fórmulas propuestas, el cual actúa como un factor secundario y terciario entre las propuestas.

Si es que tomamos los rangos máximos y mínimos, se puede también categorizar a la formulación columnar con cálculos de IS bastante amplios, pero con una distribución también asimétrica, mientras que la formulación A presenta un rango mucho menor respecto de su población.

Pasando a la estadística descriptiva de medidas de variabilidad, se analizó el factor de desviación estándar para la dispersión del índice de susceptibilidad respecto a la media y el coeficiente de asimetría de la muestra respecto a los diferentes rangos obtenidas de las formulaciones.

El mayor error típico de la desviación está presente dentro del cálculo de la reponderación B, seguido por la formulación columnar y la formulación C. La formulación con menor desviación estándar fue la formulación A, la cual alcanza el 6% de dispersión de los datos respecto a la mediana, separándose en un 0,59% respecto a la fórmula columnar.

Analizando visualmente la variación de los índices de susceptibilidad por unidad geomorfológica se pueden trazar las 4 diferentes curvas respectivas a las formulaciones. Estas gráficas (Figura 5.9) ayudan a visualizar de forma general la distribución realizada y la deformación por sobreestimación del índice de susceptibilidad en laderas.

De forma global, se puede definir un comportamiento anisótropo, con frecuencias variadas y amplitud de rangos tanto altos (Fórmula B) como bajos (Fórmula A), asociado a la desviación estándar de la muestra. El efecto de discontinuidad que se presenta en las rectas es producto de que las unidades geomorfológicas y sus respectivos IS no son graficados según los dominios geomorfológicos respectivos.

De forma particular se puede visualizar también cómo es el comportamiento del IS de cada ladera respecto a cada formulación, con el objetivo posterior de identificar aquellas laderas con un cálculo de IS desigual según cada reformulación. Al trazar una línea paralela al eje del número de unidades geomorfológicas dentro de la coordenada $IS=50$, se pueden identificar cuantas veces las unidades obtuvieron índices altos o muy altos respecto a los 4 diferentes cálculos reponderados.

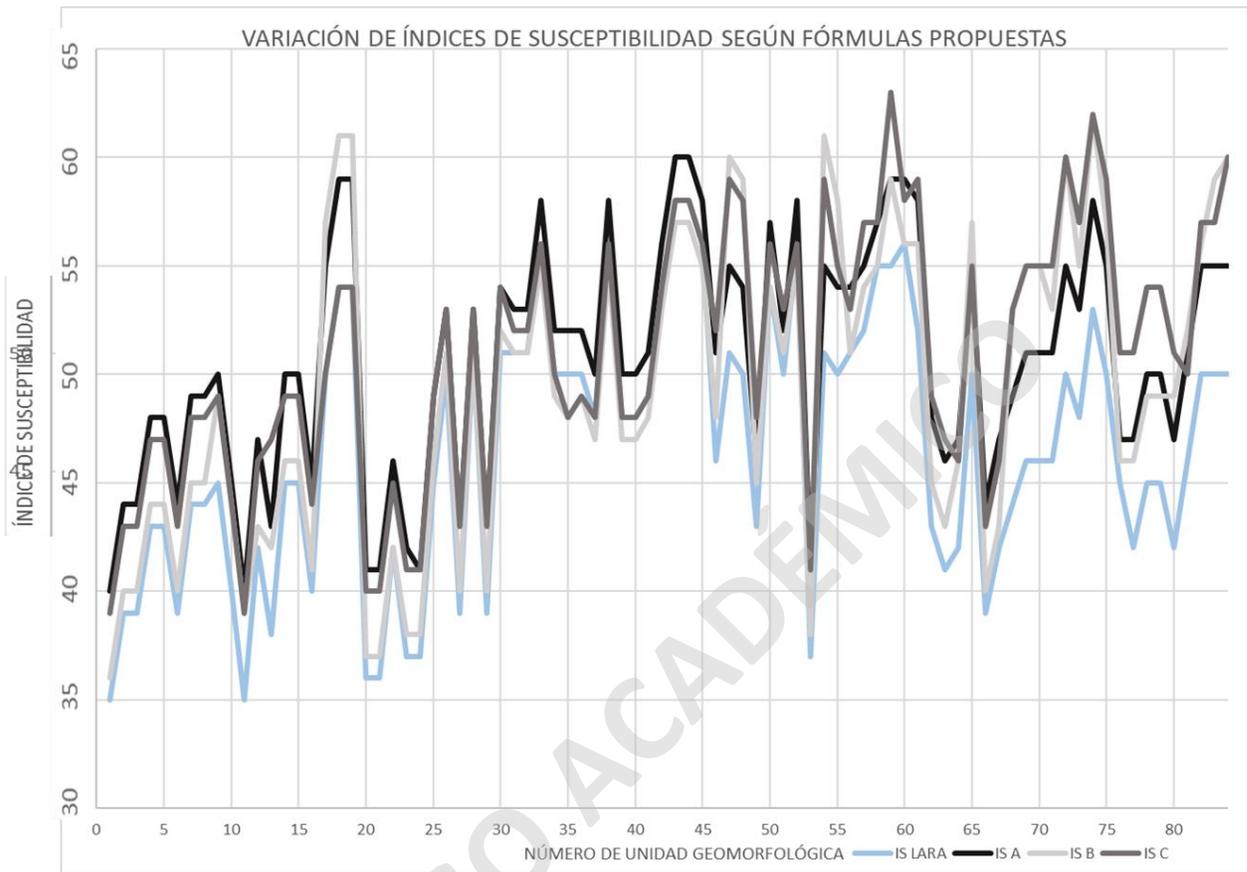


Figura 5.9: Variograma de índices de susceptibilidad según los cálculos de IS respectivos para cada formulación.

Tal y como se puede apreciar en el gráfico de variación de IS, el cálculo obtenido desde la formulación columnar se presenta por debajo de todas las demás curvas. Esta ubicación se puede diagnosticar desde la exploración estadística básica de medidas de tendencia central, con valores de media y mediana mucho más bajo que las contrapartes propuestas en este trabajo.

Respecto a las demás reformulaciones, se puede apreciar que la formulación B es la que se ubica en tercera posición la mayoría del tiempo, mientras que la reponderación A es la que ostenta el mayor número de unidades geomorfológicas con IS superior a los demás cálculos.

Aquellos casos donde la reponderación A se presenta por debajo de otra curva es explicado por los valores únicos creados por las reformulaciones. En este caso, la propuesta C presenta casos de laderas con un IS anómalo, principalmente en las unidades geomorfológicas entre los números 65 y 84. Estas laderas presentan una caracterización importante de actividad antrópica y comprenden

el dominio geomorfológico de desembocadura, cuya ponderación en la caracterización de desestabilización puede estar siendo amplificada principalmente por el puntaje asociado al cercanía de zona de falla en unidades con altas presencias de trazas humanas, los cuales se encuentran amplificados al doble por la reformulación C.

5.5 Validación de fórmulas y selección final

Este subcapítulo describe el cálculo estadístico para la validación de todos los mapas generados por este estudio, la cual es corroborada mediante los rangos de porcentaje de susceptibilidad descritos en el trabajo de Muñoz (2018). De forma resumida, un mapa será válido si es que cumple con presentar un 0-10% de unidades con índices de susceptibilidad baja, un 0-40% de unidades con susceptibilidad media y un 60-100% de unidades con susceptibilidad alta respectivamente.

5.5.1 Metodología de Lara (2007)

La estadística porcentual del mapa de Lara (Tabla 5.11), arroja que más de la mitad de las unidades geomorfológicas presentan una susceptibilidad media (56% de las unidades totales).

Tabla 5.11: Estadística de frecuencia acumulada respecto al índice de susceptibilidad en la formulación columnar y porcentaje de validación relativo (Muñoz, 2018) al total de unidades geomorfológicas.

Índice de susceptibilidad	Frecuencia Lara	%
BAJA	0	0,00%
MEDIA	47	55,95%
ALTA	37	44,05%
TOTAL	84	100,00%

Al momento de corroborar los porcentajes respecto a la metodología de validación de Muñoz (2018), se aprecia que el conjunto de dominios de susceptibilidad de unidades geomorfológicas no varía entre los rangos 0-10%, 0-40% y 60-100% respectivamente. Se presenta una sobrepoblación de unidades de susceptibilidad media que aumenta el porcentaje, desviando al parámetro de la validez, es decir, el mapa de susceptibilidad de flujos de detritos realizado con el método de Lara (2007) para Quebrada Tarapacá – Santa Rosa no cumple como mapa válido para un análisis posterior.

5.5.2 Metodología con enfoque antrópico (Este trabajo)

La estadística porcentual de los mapas generados respecto a las fórmulas propuestas en este estudio (Tabla 5.12) evidencian notorias diferencias, cumpliendo con el objetivo de alteración porcentual de unidades críticas.

Tabla 5.12: Estadística de frecuencia acumulada respecto al índice de susceptibilidad en las formulaciones A, B Y C y porcentaje de validación relativo (Muñoz, 2018) al total de unidades geomorfológicas.

Índice de susceptibilidad	Frecuencia A	%	Frecuencia B	%	Frecuencia C	%
BAJA	0	0	0	0	0	0
MEDIA	32	38%	44	52%	37	44%
ALTA	52	62%	40	48%	47	56%
TOTAL	84	100%	84	100%	84	100%

Dentro de la validación realizada, solo una de las tres fórmulas propuestas puede ser utilizada como objeto para la discusión y crítica de la metodología de susceptibilidad de flujos con enfoque antrópico.

La fórmula B y el mapa que lo respecta corresponden al producto menos válido, debido a que más de la mitad de las unidades geomorfológicas descritas presentan una índice de susceptibilidad medio. La fórmula C a su vez tampoco es válida, aunque se acerca tangencialmente a los rangos de validez de susceptibilidad alta propuestos dentro de la metodología de validación por frecuencias (56% de las unidades), faltando solo un 4% del dominio de unidades geomorfológicas. La fórmula A presenta un 38% de unidades con índice de susceptibilidad medio y un 62% de unidades con índice de susceptibilidad alta, cumpliendo con los parámetros definidos en Muñoz (2018) para la validez de un mapa de susceptibilidad de flujos de detritos. El mapa de susceptibilidad y el porcentaje de unidades con IS inéditos propuestos por la formulación A se adecua entre los rangos de validación: 0-10% (0% para esta fórmula) de unidades con susceptibilidad baja, 0-40% (38% para esta fórmula) de unidades con susceptibilidad media y 60-100% (62% para esta fórmula) de unidades con susceptibilidad alta, siendo el único mapa válido. El producto generado será utilizado dentro de la fase de discusión (Capítulo 6 de este estudio) y se procederá a realizar la superposición de capas vectoriales respecto al mapeo de trazas antrópicas, sobre el mapa de susceptibilidad de flujos de detritos realizado con la reformulación aritmética A.

6 Discusión

6.1 Correlación y efecto real del factor antrópico en el factor geológico/geotécnico de Quebrada Tarapacá – Santa Rosa

La predominancia del factor humano dentro de la estabilización de laderas de Quebrada Tarapacá Santa Rosa puede ser obtenida a través de la interpolación de los productos visuales y la caracterización in situ de laderas de forma numérica y cualitativa con presencia de intervención humana, cumpliendo como las herramientas más efectivas para obtener la formalización de la validación respecto a la reponderación propuesta A, logrando comparar las formulaciones propuestas y las diferentes caracterizaciones cuantitativas de factores sin la necesidad de recurrir nuevamente a los mapas. La integración de estas variables fue reproducida para la zona de desembocadura, zona central y para la zona de cabecera, incorporando el IS calculado para cada una de estas unidades críticas.

Estas imágenes finales comprenden laderas que presentan calificaciones de susceptibilidad diferentes para todas las formulaciones propuestas, teniendo en consideración preliminarmente que los estudios preliminares en la zona presenten leves desajustes al momento de ejecutar la metodología que generan una subestimación de los índices de susceptibilidad obtenidos.

En base a la evidencia descrita previamente en capítulos anteriores, las 3 formulaciones propuestas comprenden notorias diferencias las cuales fueron expuestas en los productos visuales y en el cálculo de IS en general. Es por esta razón que este penúltimo capítulo de discusión comprende la evaluación de 3 dominios generalizados o macrodominios geomorfológicos definidos por este estudio, para la definición del impacto humano en toda la cuenca.

Tal y como se expuso en la metodología de este estudio, este subcapítulo utiliza las unidades definidas como naturales (Sin impacto antrópico y condiciones geotécnicas de buena estabilidad) y contrasta a las unidades que presentan un IS crítico principalmente desde la formulación A. Aquellas unidades que consiguieron obtener sólo 1 cálculo de IS sobre 50 (6 para la fórmula A, 3 para la fórmula C), serán analizadas para definir si el impacto humano es lo suficientemente activo como para afectar el factor natural geológico y si existen efectos de sobrestimación o subestimación respecto a la reformulación A (fórmula más valida respecto a las demás propuestas). Estas UGM con alza de IS son encontradas principalmente en la zona central y en la zona de cabecera, por lo que fueron incorporadas unidades de la porción de desembocadura para entender a cabalidad la afectación hacia la cuenca producto del impacto antrópico.

La zona de desembocadura de la cuenca Tarapacá – Santa Rosa (Figura 6.1) evidencia el mayor número de actividades antrópicas, considerando impactos altos para infraestructura crítica y modificación artificial de laderas, como impactos bajos por contención aluvional de rocas, compactación y desgaste del terreno, etc. Respecto al aspecto geotécnico-geológico, las laderas presentan un desarrollo de fracción fina en la composición de matriz del suelo sobre las unidades rocosas, afectando directamente la estabilidad de la ladera y la capacidad de retención de humedad. También, se pueden encontrar diversas canaletas que bifurcan el cauce natural de escorrentía, modificando probablemente las condiciones de humedad. Es importante mencionar que las laderas pueden mantener condiciones de estabilidad aun teniendo otros factores predominantes como favorables. Según las actividades humanas en la zona baja de la quebrada, se puede determinar que existe una afectación predominante hacia la compacidad y tensión intersticial de los granos que componen las laderas, con un efecto en la humedad de segunda escala. La porción de desembocadura y el desarrollo de suelo en general (según los cálculos de humedad y granulometría) presentan naturalmente condiciones de inestabilidad producto del contenido de finos en el suelo (sin incluir el factor de predominancia geomorfológica). Esta zona es la más intervenida posiblemente para la contención temprana de un posible flujo, ya que se evidencian diversas estructuras que cumplen presencia para disminuir la intensidad de algún evento fluidizado, tales como rocas, paredones de concreto o porciones de contención (las cuales además se encuentran destruidas o enterradas, manteniendo el impacto hacia las condiciones naturales. El IS para aquellas unidades con un impacto importante en la cuenca debe ser interpretado siempre con la condición geotécnica de la ladera para no hacer falsas interpretaciones. Por ejemplo, la ladera 70 si bien presenta una intervención antrópica importante, su condición geotécnica es no favorable alcanzando sobre los 50 puntos en todos los cálculos. En este caso, sería erróneo mencionar que la unidad 70 debiese tener condiciones muy altas de susceptibilidad, ya que eso excedería la homogeneidad geológica entre las demás laderas. Lo natural es obtener unidades con IS similar entre todas, dependiendo del tipo de afectación antrópica, pero por sobretodo la condición geotécnica. En este caso, aquellas unidades que presentan impacto humano además coinciden en tener una condición geotécnica y de inestabilidad favorable (nótese la inclusión) serían catalogadas como unidades de alto índice de susceptibilidad de flujos ($IS > 60$). Bajo la interpretación de los IS en conjunto a los demás factores en las laderas de la porción de desembocadura, se puede afirmar que la mayoría de estas unidades debiesen tener índices sobre 50 y solo sobre 60 en excepciones.

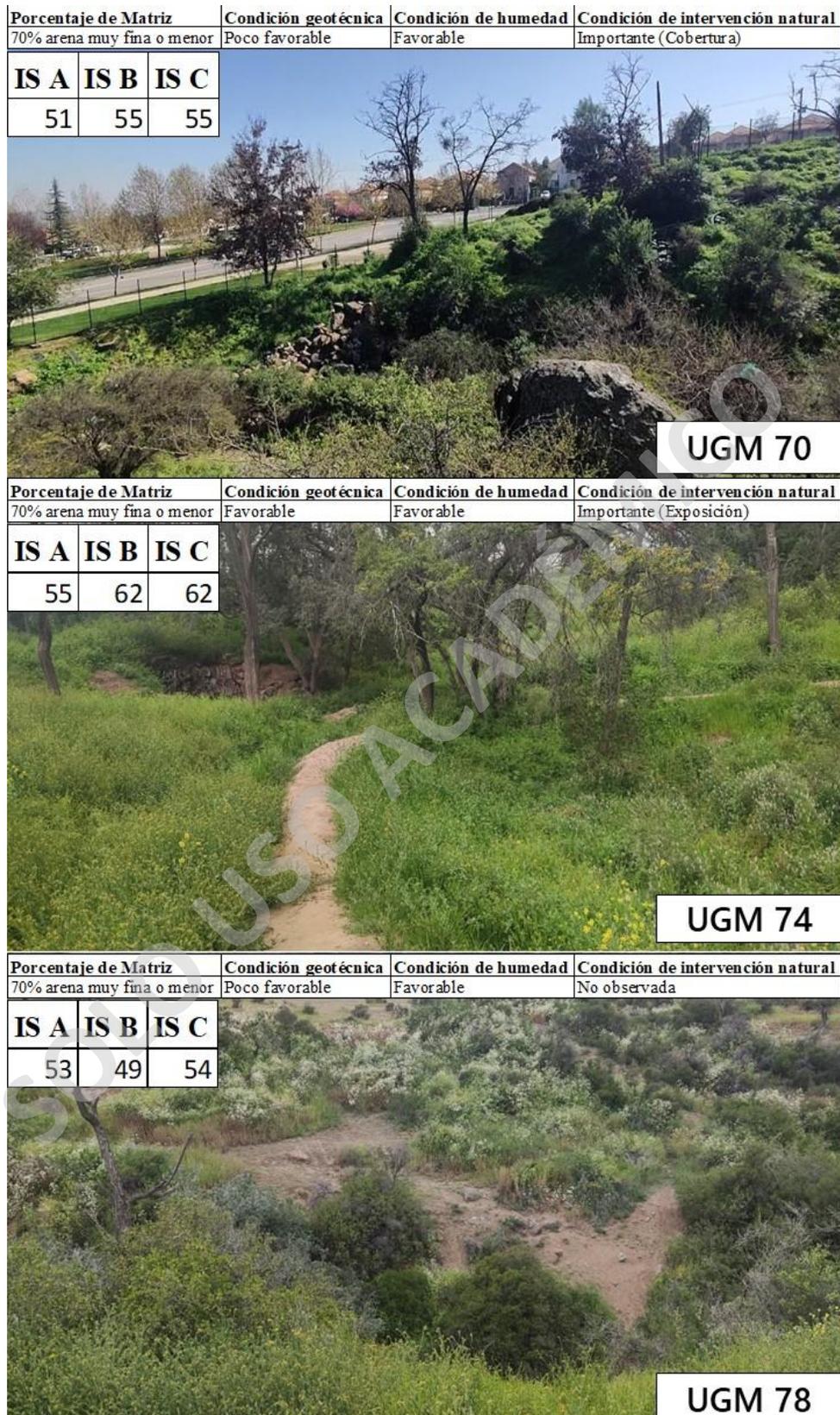


Figura 6.1: Descripción cualitativa y cuantitativa de susceptibilidad para unidades geomorfológicas pertenecientes al macrodominio geomorfológico de desembocadura en Quebrada Tarapacá – Santa Rosa.

La zona central por su parte (Figura 6.2) evidencia un número considerable de actividades antrópicas de bajo impacto como torres de alta tensión, movilización de vehículos y movilización de personas. Considerando impactos altos para infraestructura crítica y modificación artificial de laderas se considera la cimentación de la infraestructura eléctrica como principal agente de compactación y desgaste del terreno. Respecto al aspecto geotécnico-geológico, las laderas presentan un desarrollo de fracción fina en la composición de matriz del suelo sobre las unidades rocosas, pero en menor porcentaje que la zona de desembocadura, afectando directamente, pero en menor cantidad a la estabilidad de la ladera y la capacidad de retención de humedad.

La porción de desembocadura y el desarrollo de suelo en general (según los cálculos de humedad y granulometría) presentan naturalmente condiciones de inestabilidad producto del contenido de finos en el suelo (sin incluir el factor de predominancia geomorfológica). Esta zona es la de menor intervención, posiblemente provocado por el cuidado remoto de la cuenca generado por las normativas y la comunidad, atendiendo a la contención temprana de un posible flujo.

El IS para aquellas unidades con un impacto importante en la cuenca debe ser interpretado siempre con la condición geotécnica de la ladera para no hacer falsas interpretaciones. Según las actividades humanas en la zona baja de la quebrada, se puede determinar que existe una afectación leve hacia la compacidad y tensión intersticial de los granos que componen las laderas, con un efecto en la humedad de segunda escala. Esto quiere decir de que la zona central en general, además de presentar condiciones geológicas similares en el desarrollo de suelo, existe un impacto humano leve que, en conjunto al factor de predominancia geomorfológico debiesen presentar índices de susceptibilidad sobre 50 y 60 en casos completamente excepcionales (como la ladera 18).

La ladera 9 y 14 son laderas que coinciden en ser unidades destacadas por la formulación A, es decir, estas unidades obtuvieron solo un IS alto de peligro de susceptibilidad. Bajo la interpretación de los IS en conjunto a los demás factores en las laderas de la porción de desembocadura, se puede afirmar que la mayoría de estas unidades debiesen tener índices sobre 50 mínimo gracias a la caracterización de los factores predominantes de geomorfología y geología-geotecnia, sumando al puntaje como 3 factor predominante a la antropización. Las laderas de la porción central y su descripción son la principal evidencia de que las propuestas B y C mantienen el efecto de subestimación de IS producto de la mantención de la ponderación original del factor antrópico, esclareciendo que laderas de por ejemplo: 30°, 60 por ciento de arena muy fina o menor en la matriz e impacto humano bajo y alto son unidades geomorfológicas con índices de susceptibilidad media.

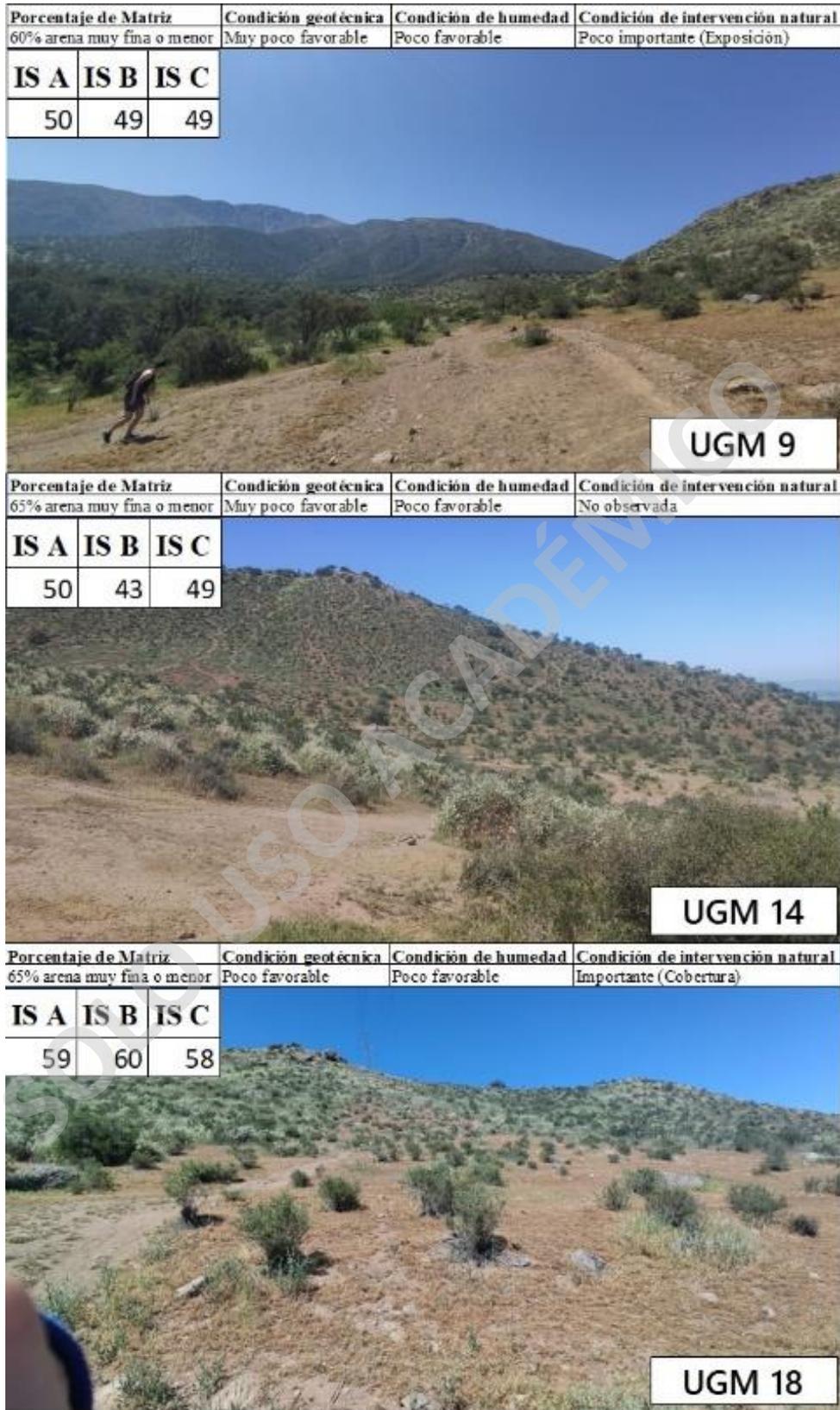


Figura 6.2: Descripción cualitativa y cuantitativa de susceptibilidad para unidades geomorfológicas pertenecientes al macrodominio geomorfológico central en Quebrada Tarapacá – Santa Rosa.

Finalmente, la porción de cabecera (Figura 6.3) evidencia un número considerable de actividades antrópicas de alto impacto principalmente asociada a la modificación geomorfológica sectorizada en la cuchilla norte de la cuenca. Considerando impactos altos para infraestructura crítica y modificación artificial de laderas se considera la cimentación de la infraestructura eléctrica como principal agente de compactación y desgaste del terreno. Respecto al aspecto geotécnico-geológico, las laderas presentan un desarrollo de fracción fina en la composición de matriz del suelo sobre las unidades rocosas, en menor porcentaje que la zona de desembocadura, pero mayor que la zona central, afectando directamente a la estabilidad de la ladera y la capacidad de retención de humedad. La porción de cabecera y el desarrollo de suelo de la zona (según los cálculos de humedad y granulometría) presentan naturalmente condiciones de inestabilidad producto del contenido de finos en el suelo, incluyendo considerablemente el factor de predominancia geomorfológica en el puntaje. Las unidades de cabecera en rasgos generales mantienen índices elevados de peligro, pero siempre se debe considerar la condición geotécnica preliminarmente para poder explicar el efecto humano, es decir, las unidades deben ser catalogadas con susceptibilidades de desestabilización altas o muy altas dependiendo de si el desarrollo de suelo se encuentra estabilizado según la geotecnia y la hidrología. Según las actividades humanas en la zona alta de la quebrada, se puede determinar que existe una afectación leve hacia la compacidad y tensión intersticial de los granos que componen las laderas, con un efecto en la humedad bajo. Esto quiere decir de que la zona alta presenta condiciones geológicas diferentes en el desarrollo de suelo, que, a pesar de existir un impacto humano leve, el factor de predominancia será el geomorfológico y el geotécnico producto de la naturaleza de los escarpes exhumados de Formación Abanico.

Las unidades geomorfológicas naturalmente debiesen presentar índices de susceptibilidad sobre 55 y 60, pero 50 en casos completamente excepcionales (como la ladera 40) tal y como describe Celis (2018). Analizando las propuestas de formulación, nuevamente se exhibe evidencia de la distancia significativa de rangos máximos y mínimos generados por las propuestas B y C, donde laderas con escarpes sobre los 50° mantienen índices de susceptibilidad medios y unidades con evidencia de trazas humanas que afectan ampliamente a la estabilidad de la ladera mantienen índices de susceptibilidad extremadamente altos.

A modo de formalización, la propuesta de reponderación A mantiene una exactitud a las características geológicas reales de la quebrada, manteniendo índices de susceptibilidad entre los 40 y los 60 puntos, favoreciendo a las porciones que naturalmente merecen tener esa evaluación.

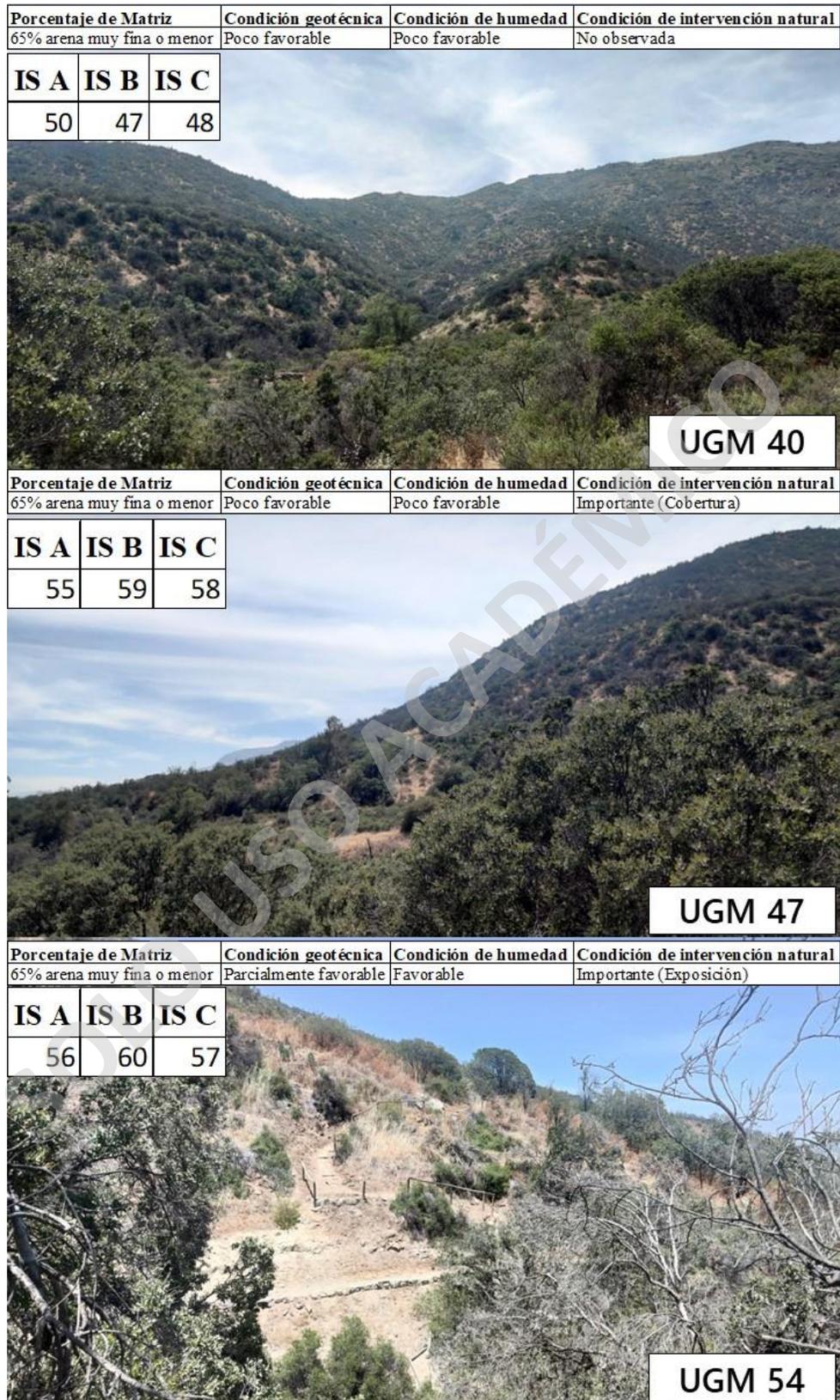


Figura 6.3: Descripción cualitativa y cuantitativa de susceptibilidad para unidades geomorfológicas pertenecientes al macrodominio geomorfológico de cabecera en Quebrada Tarapacá – Santa Rosa.

6.2 Correlación real del factor antrópico en el factor de humedad de Quebrada Tarapacá – Santa Rosa

La correlación entre el factor antrópico y el factor de humedad en laderas es otro de los objetivos a obtener en este estudio. El impacto real del factor antrópico sobre la condición de humedad de la cuenca pretende la numeración de trazas humanas respecto a la modificación de cauces naturales, es decir, actividades que pueden alterar el entorno hídrico de las unidades como la deforestación, la urbanización, la construcción de infraestructuras o la agricultura.

Como se ha descrito antes, las actividades antrópicas pueden afectar significativamente el factor de humedad en las laderas, por ejemplo, la deforestación masiva elimina la cobertura vegetal, lo que conduce a una disminución en la capacidad de retención de agua del suelo. Sin la protección de la vegetación, la lluvia cae directamente sobre el suelo, provocando una mayor escorrentía superficial y una disminución de la infiltración. Esto puede resultar en una disminución de la humedad en las laderas y aumentar la vulnerabilidad a los procesos de erosión y deslizamiento.

Además de la deforestación, la urbanización y la construcción de infraestructuras también pueden alterar los patrones naturales de drenaje en las laderas. La pavimentación de áreas extensas puede interrumpir el flujo de agua en el suelo, tal y como se aprecia en la figura 6.4. Esto no solo reduce la cantidad de agua disponible para la humedad del suelo, sino que también puede provocar una concentración de agua en áreas específicas, lo que aumenta el riesgo de erosión y deslizamientos de tierra. Sin embargo, estas trazas antrópicas solo han sido identificadas en la porción de desembocadura y en la cabecera (Pero en puntos específicos), por lo que no es correcto mencionar que la cuenca presenta un impacto humano directo si no más bien que existen porciones que pueden verse afectadas directamente respecto a la regulación de humedad en las laderas. Estos cambios en el factor de humedad pueden tener consecuencias negativas significativas, la disminución de la humedad y la pérdida de vegetación pueden debilitar la estabilidad, aumentando la probabilidad de desestabilización de las laderas. Para abordar estos problemas, es fundamental considerar tanto el factor antrópico como el factor de humedad en las laderas al evaluar los riesgos geológicos y desarrollar prácticas de manejo del suelo sostenibles. La conservación de la vegetación en las laderas, mediante la implementación de medidas como la reforestación o la protección de áreas naturales, puede ayudar a mantener la humedad del suelo y fortalecer la estabilidad de las laderas.



Figura 6.4: Impactos antrópicos que afectan al factor de humedad dentro de la porción de desembocadura de Quebrada Tarapacá – Santa Rosa.

La alteración de la cobertura vegetal, la obstrucción geológica, el impacto directo al desarrollo de suelo Holoceno y a los patrones de drenaje activos pueden estar significativamente afectados por la humedad del suelo, pero debido a la escala de la cuenca, se ve dominada principalmente por las condiciones atmosféricas locales y a las escorrentías esporádicas, con un aumento de riesgo de erosión y deslizamientos de tierra progresivo por la implementación de manejo del suelo insostenible.

El factor de humedad en Quebrada Tarapacá – Santa Rosa se relaciona directamente con el contenido de agua presente en el suelo de las laderas y tanto la cantidad como la distribución espacial de la humedad en las laderas tienen un rol predominante en la estabilidad de las unidades geomorfológicas. La presencia de agua en el suelo mantiene la cohesión interclasto, mejorando la resistencia de los materiales y evitando el deslizamiento de las capas superficiales siempre y cuando no exista saturación. Además, la humedad contribuye a la formación de una vegetación densa, que ayuda a retener el suelo y prevenir la erosión, factor utilizado por esta metodología.

La sección de desembocadura y cabecera contempla el mayor impacto antrópico respecto al factor de humedad para todas las formulaciones, pero no es una condicionante afectada tan directamente. Sin embargo, es de notar que, a pesar de las leves variaciones encontradas en los resultados de humedad respecto a la porción de la cuenca, la Quebrada cuenta con límites acotados para el cumplimiento de los ciclos hídricos, por lo que las trazas localizadas pueden estar afectando a estos.

6.3 Correlación visual de trazas antrópicas y caracterización de laderas

Gracias a las herramientas visuales que se utilizan para entregar los índices de susceptibilidad de remociones en masa se pueden realizar diferentes extrapolaciones de datos vectoriales sobre capas raster u otras capas vectoriales, los cuales pueden indicar tanto condiciones geológicas como también condiciones del desencadenamiento de eventos de flujos de detritos en base a modelos predictivos. En este caso, para analizar la correlación entre las trazas antrópicas y el cálculo de IS (respecto a la fórmula válida A) sin la necesidad de revisar continuamente la base de datos y la caracterización numérica, se incorporaron diferentes máscaras vectoriales para su comparación.

Una de las capas vectoriales que componen este análisis corresponde al trazado de unidades georfológicas, incorporando el valor de índice de susceptibilidad calculado para esa ladera, asociando una colorimetría respectiva al grado de probabilidad de desestabilización caracterizada previamente en las fases de terreno. Unidades que muestren una susceptibilidad alta probablemente definen unidades geomorfológicas muy propensas a la inestabilidad de laderas, es decir, unidades con pendientes escarpadas cercacas a zonas de falla, con un pobre desarrollo de la compactación y cohesión del sustrato tanto por condiciones naturales, de saturación de humedad y/o impacto antrópico que se haya evidenciado sobre la unidad geomorfológica.

Para analizar de forma más particular los cambios en el cálculo de IS respecto al factor antrópico, se incorporó a la máscara de unidades geomorfológicas en primer lugar la capa vectorial de trazas antrópicas menores y mayores a 70 km² georreferenciada para Quebrada Tarapacá – Santa Rosa, tal y como se aprecia en la figura 6.5. En base a este mapeo se puede correlacionar el efecto local de ciertas trazas antrópicas respecto al nivel de impacto geomorfológico y al factor geológico-geotécnico de las unidades, utilizando el concepto de homogeneidad de laderas y las descripciones bibliográficas del factor antrópico en la estabilidad de unidades geomorfológicas.

Basando el impacto antrópico respecto a las modificaciones de la traza catalogada (anexo 1), se puede apreciar que la desembocadura norte de la cuenca se presenta fuertemente antropizada, con presencia predominante de trazas para la contención aluvional. La gran mayoría de estas trazas presentan un efecto de desestabilización por aumento en la tensión superficial y modificación de carácter profundo a la estratigrafía, generando importantes niveles de IS calculados en esta porción.

La desembocadura sur por otro lado presenta menos evidencia de impacto antrópico, sin embargo, estas cuentan con importantes alteraciones al relieve, principalmente a las condiciones geomorfológicas y geotécnicas del sustrato evidenciando altos índices de susceptibilidad.

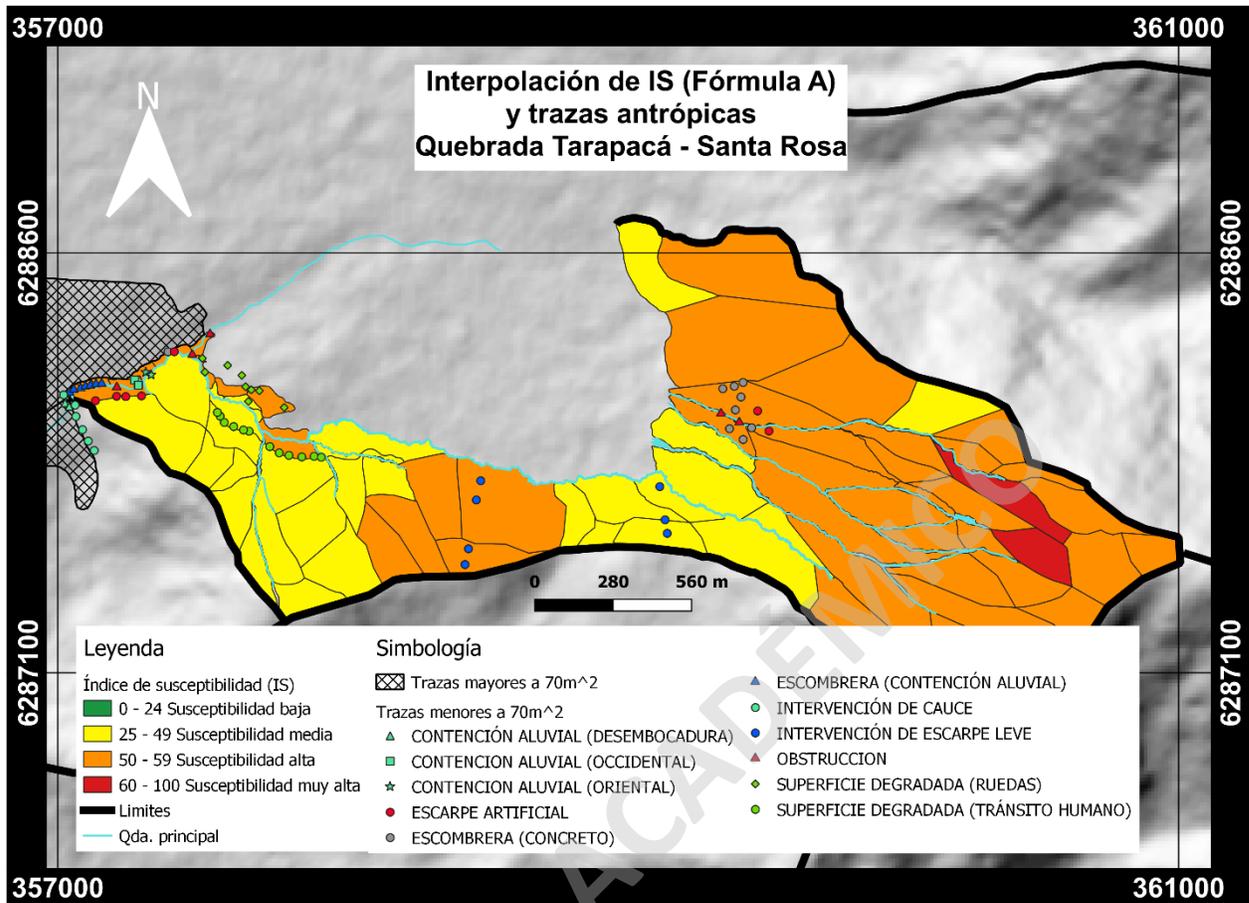


Figura 6.5: Mapa de susceptibilidad de flujos e inventario de trazas antrópicas para Quebrada Tarapacá – Santa Rosa.

De forma global, las trazas ubicadas en Quebrada Tarapacá – Santa Rosa son ubicadas en zonas de susceptibilidad de desestabilización geotécnica medianamente favorables a ceder, pero la presencia y efecto de estas provocan un aumento importante del índice elevando la susceptibilidad hasta tendencias de peligro alto.

Es de notar aquellas zonas donde se presentan niveles de susceptibilidad media pero que evidencian al factor antrópico condicionando la ladera. Generalmente, una ladera con un impacto importante se ve afectada en las condiciones geomorfológicas, geotécnicas y de humedad, incorporando el puntaje asociado tanto a estos factores como al factor antrópico como tal, marcando niveles de susceptibilidad de flujos de detritos sobre el 50% como norma general para esta formulación (mediana en 51 puntos). Sin embargo, existen diversos tipos de impacto que contemplan modificaciones leves a las condiciones de las unidades geomorfológicas, esto principalmente asociado a un impacto muy superficial del suelo sin modificar o modificando levemente las condiciones de tensión, cohesión y humedad del sustrato.

2 de estos de ejemplos se ubican principalmente sobre unidades con índices de susceptibilidad medio en laderas de la desembocadura norte y porción central, es decir, corresponden a unidades que se encuentran condicionadas principalmente por el efecto geomorfológico y de la cercanía a las zonas de fallas, pero cuyo sustrato o condiciones geológicas geotécnicas presentan condiciones poco favorables para la desestabilización de ladera.

Las trazas antrópicas que representan un menor impacto corresponden principalmente a la degradación superficial del suelo por tránsito humano y las intervenciones al escarpe de carácter leve, es decir, aplanamientos en superficies de área métricos y fundaciones someras de infraestructura crítica de electricidad.

En contraparte, el impacto antrópico asociado al tránsito vehicular o la modificación geomorfológica de las unidades para el despliegue de fundaciones e infraestructuras de concreto por ejemplo representan una alteración con importancia mucho mayor respecto a las trazas de bajo impacto, ya que estas generalmente afectan grandes distancias de sustrato, modificando por consecuencia tanto las tensiones intersticiales de los granos como el factor de humedad asociado a estos por las condiciones energéticas diferenciales que experimentan las laderas al momento de ser intervenidas. Es imperante marcar el tipo de diferencias que genera el factor antrópico respecto al grado de estabilidad de las unidades geomorfológicas, ya que en estudios de escalas más locales, las condiciones naturales de la geología de las cuencas no debería ser tan heterogénea y variable respecto a los dominios geomorfológicos, marcados principalmente por las pendientes de ladera, exposición solar y dirección de los cauces, generando que los cálculos de IS en susceptibilidades medias y altas varíen simplemente por la descripción de la presencia de trazas humanas.

Quebrada Tarapacá – Santa Rosa marca claros índices de susceptibilidad alta respecto a la génesis de flujos de detritos, sin embargo, se ha de incorporar la totalidad de antecedentes de la cuenca para poder analizar finalmente el peligro y riesgo que pueden generar las trazas humanas y su impacto.

Para completar el análisis respecto a la predominancia del factor humano en la cuenca y el efecto que este provoca dentro de las diferentes reponderaciones, se debe complementar a la exploración estadística una interpolación de los diferentes factores condicionantes incorporando el mapeo de trazas humanas, para así visualizar de forma desglosada el cálculo de índice de susceptibilidad realizado mediante las diferentes formulaciones, y así definir mediante medidas cuantitativas y

visuales el efecto completo del agente humano en las propuestas tanto en la más válida como en las menos válida.

De forma general y respecto a la reformulación propuesta con enfoque antrópico, la cuenca mantiene 3 factores condicionantes a flujos predominando en el cálculo de índice de susceptibilidad: el factor geomorfológico, geológico-geotécnico y el factor antrópico.

Tal y como se ha mencionado antes, el factor geotécnico mantiene una intrínseca relación con el impacto humano hacia el desarrollo de las laderas. La figura 6.6 remarca evidencias respecto a una heterogeneidad geotécnica en los diferentes dominios geomorfológicos a partir de la trazabilidad de la condición geotécnica de las laderas en el producto, donde si bien se mantiene una homogeneidad en el tamaño de grano descrito en cada uno de los microdominios, existen diferencias notorias en la calidad geotécnica de las laderas, divergiendo del desarrollo natural en ciertos sectores cuya estabilidad se encuentra directamente resguardada por una traza humana.

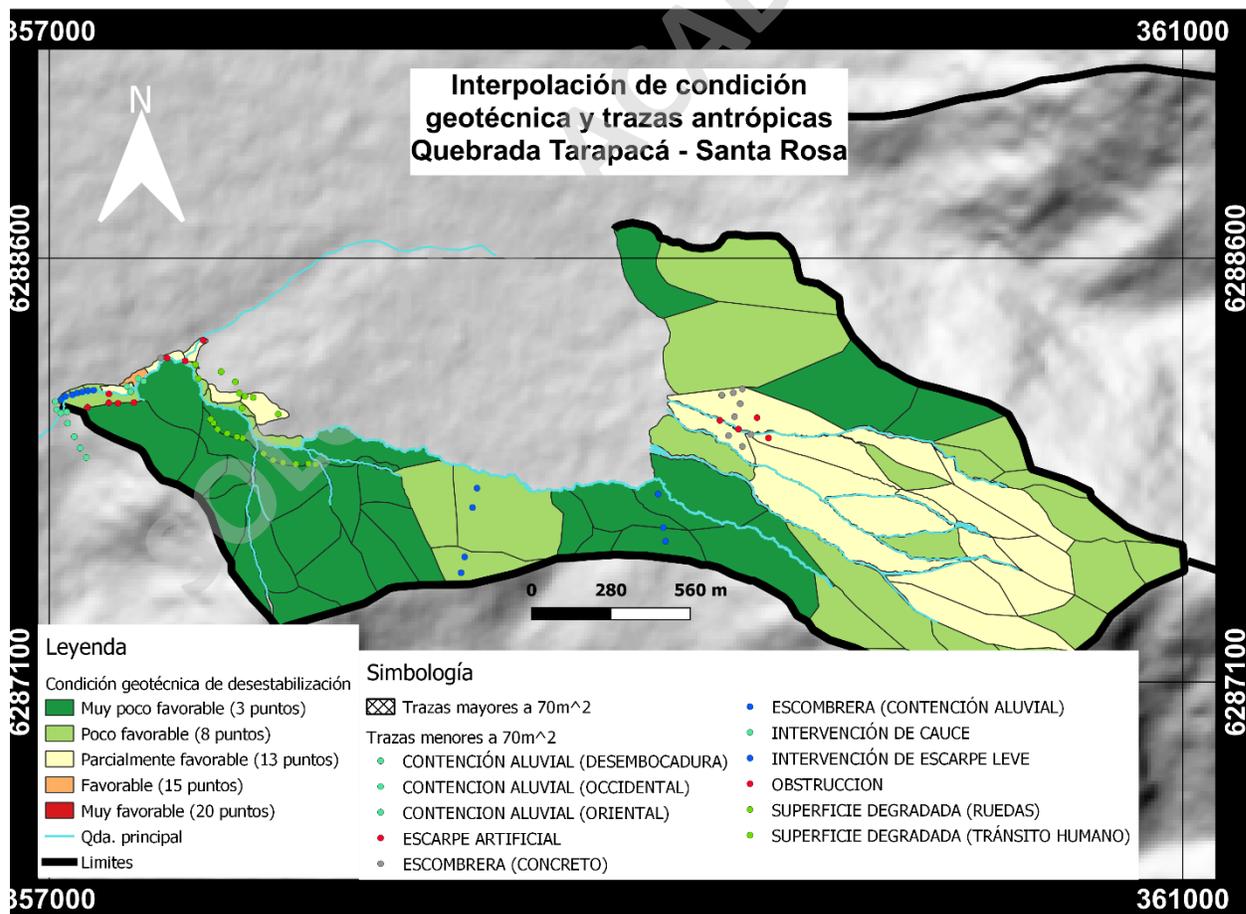


Figura 6.6: Mapa de condición geotécnica e inventario de trazas antrópicas para Quebrada Tarapacá – Santa Rosa.

Las porciones de la cuenca Tarapacá – Santa Rosa que presentan la mayor favorabilidad de desestabilización comprenden tanto las zonas bajas como las altas de la hoya, sin embargo, se presenta solo una unidad geomorfológica con una condición favorable o muy favorable. Esta analogía se puede trazar desde los primeros mapas de colorimetría realizados, donde se indica previamente en los límites máximos del cálculo de IS que existen muy pocas unidades geomorfológicas con condiciones de susceptibilidad muy altas, es decir, el factor geotécnico actual de las unidades si bien se presenta categorizado como parcialmente favorable, en gran parte de la cuenca el nivel de desestabilización es bajo, por lo que el cálculo del factor geotécnica respecto al índice de susceptibilidad no presenta una mayor influencia en los cálculos de IS validados, manteniendo al factor geomorfológico y antrópico como predominantes. Es importante notar que, a partir de la desaparición de las trazas en dirección a la cabecera, las únicas unidades que naturalmente son inestables son las ubicadas en las porciones centrales y altas cumbres de esta, producto principalmente por las condiciones climáticas y tectónicas que meteorizan el suelo. Al momento de incorporar el factor antrópico al producto geológico se pueden correlacionar los diferentes impactos a la cuenca en estudio. Las unidades que presentan las peores condiciones de estabilidad respecto a la cohesión del sustrato exhiben evidencias de impacto humano hacia las unidades de ladera, tal y como se aprecia en la Figura 6.7. Este impacto se encuentra directamente correlacionado con el mapeo de trazas antrópicas realizado previamente, donde se presenta un efecto de desestabilización alto para trazas que involucran principalmente cambios en la cohesión natural del sustrato y la tensión superficial experimentada por las unidades. Aquellas trazas que son definidas como baja escala o que no impactan de forma importante la columna estratigráfica de los depósitos, se denotan como impactos poco relevantes, es decir, las trazas humanas asociadas a la degradación superficial de los depósitos mediante el tránsito humano. Por ejemplo, si bien existen partes donde el impacto humano no aporta realmente a la desestabilización geotécnica como tal, existen algunas laderas que si presentan alteraciones producto del tránsito vehicular principalmente, produciendo embotellamientos y obstrucciones que aumentan el IS. La evidencia de al menos 11 tipos diferentes de trazas antrópicas dispersados por la cuenca da a entender de que al menos las propuestas de reponderación A, B y C fueron debidamente justificadas, incorporando el balance estadístico de subestimación obtenido de la formulación columnar.

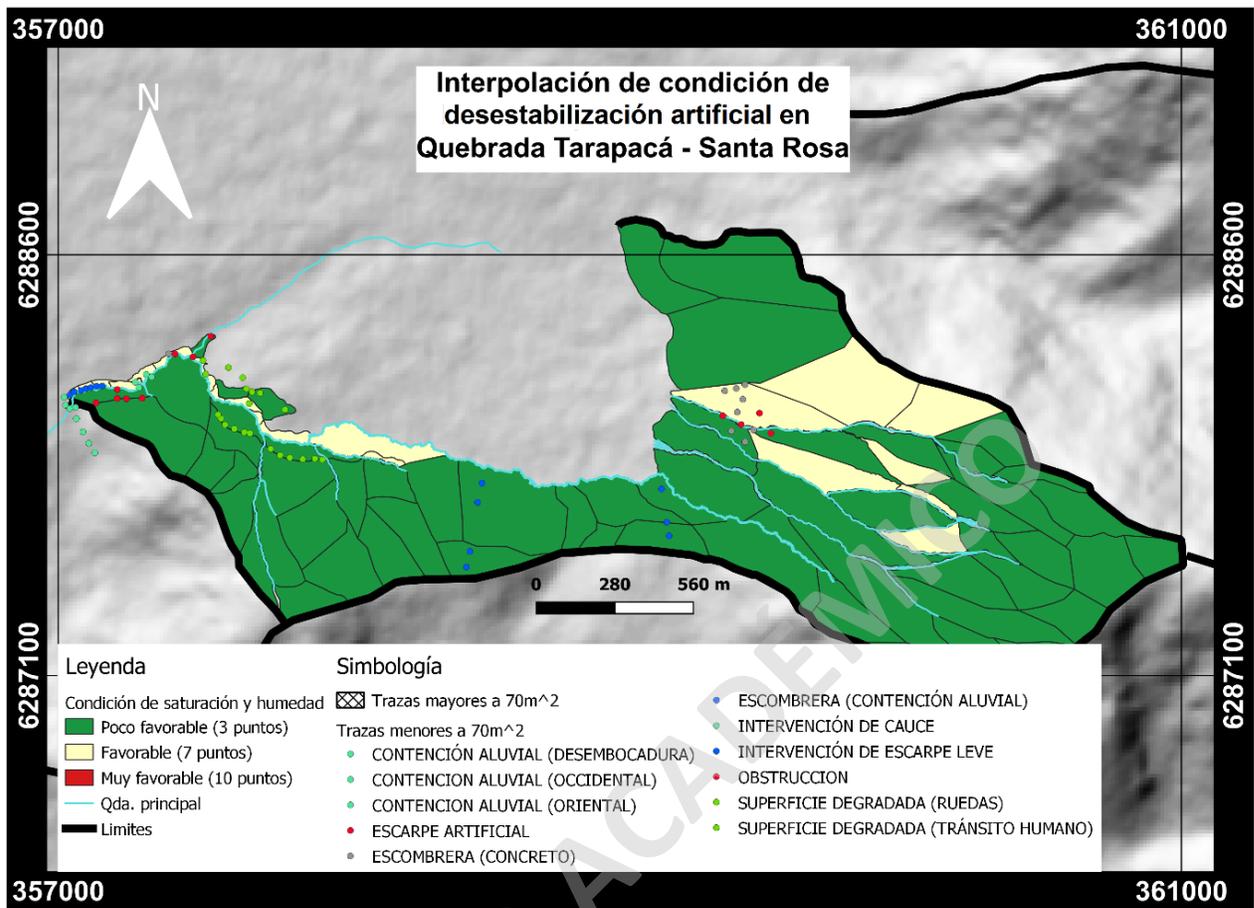


Figura 6.7: Mapa de desestabilización artificial e inventario de trazas antrópicas para Quebrada Tarapacá – Santa Rosa.

Al momento de analizar las condiciones de saturación y humedad de las unidades geomorfológicas (Figura 6.8) e integrar los resultados obtenidos en laboratorio, se puede definir preliminarmente que dentro de la cuenca se presentan pequeñas relaciones entre las trazas humanas y las condiciones de humedad calculado dentro de las unidades.

Según la evidencia climatológica y de vegetación, las cuencas orientales de la provincia de Santiago comprenden (en algunos casos) la protección de bosques alóctonos y autóctonos que comprenden una recuperación de la estabilidad de saturación de agua basados en la protección ecológica, el trabajo social de las comunidad y las municipalidades cuyos territorios comprenden las cercanías del piedemonte andino. El caso de la Quebrada Tarapacá – Santa Rosa respecto a la humedad es favorable en cierto aspecto, ya que la supervivencia del último Bosque Esclerófilo (El Panul) en las cabeceras y porciones centrales de la cuenca mantienen un sustrato hidratado con retención de humedad probablemente producto de la fracción fina en el suelo.

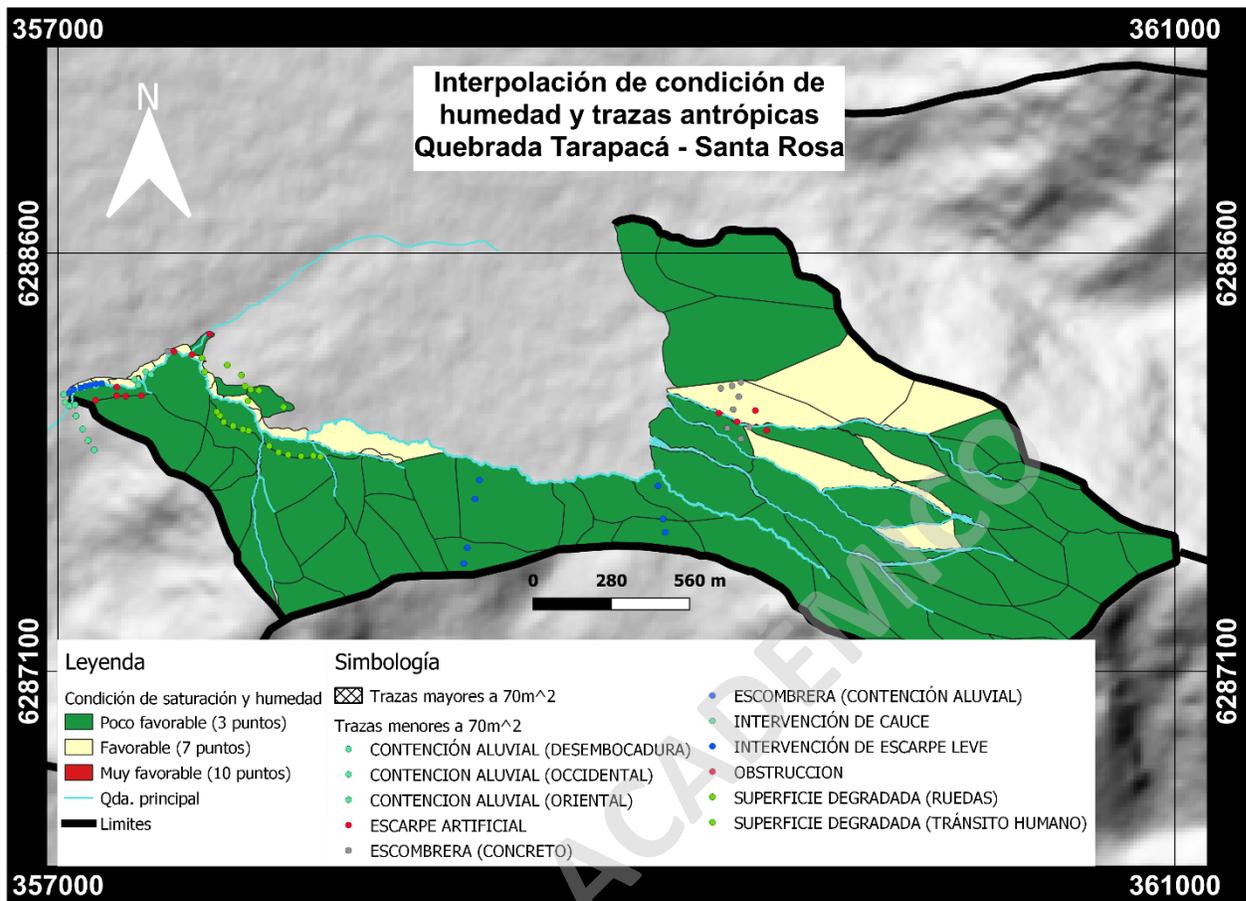


Figura 6.8: Mapa de condición de saturación e inventario de trazas antrópicas para Quebrada Tarapacá – Santa Rosa.

Las principales trazas que se presentan sobre las unidades categorizadas como favorables para la desestabilización por humedad son aquellas que se encuentran cubriendo a las unidades geomorfológicas y por consecuencia la condición subaérea de las laderas, pero es difícil poder asumir el impacto completo de las trazas respecto a este factor.

Las cuantificaciones de humedad realizadas por este estudio corresponden a estimaciones numéricas y propuestas de jerarquización visual por la exposición solar de las unidades presentes, sin contar la baja predominancia del factor de humedad respecto al índice de susceptibilidad.

Finalmente, es de notar que la aseveración respecto a la correlación entre las trazas y el factor de humedad sin tener la evidencia numérica o muestreos de las condiciones climáticas en intervalos cortos de tiempo son bastantes difusas, por lo que este producto si bien explica la relación preliminar de ciertos factores naturales respecto a la humedad, no será utilizado como el factor predominante para hablar de desestabilización de las unidades geomorfológicas.

Los productos geológicos y la incorporación de las diferentes máscaras vectoriales revelan importantes conclusiones respecto al peligro de desestabilización de las laderas. Las condiciones de peligro geológico y la susceptibilidad de desestabilización presentes en la Quebrada Tarapacá – Santa Rosa han sido catalogadas con índices altos principalmente, sin embargo, no todos los factores predominan al momento de calcular el IS final dentro de la cuenca. Las unidades a modo global presentan condiciones de inestabilidad natural, asociado primordialmente al factor geológico y al tipo de sustrato desarrollado, incorporando también el factor geomorfológico predominante que aumenta esta susceptibilidad debido a las condiciones físicas del movimiento en las unidades.

El impacto del factor antrópico denota claras zonas desestabilizadas artificialmente con diferentes niveles de alteración tanto a la geomorfología como a las condiciones de estabilidad geotécnicas descritas. Si bien el impacto humano no es lo suficientemente importante para el desarrollo de la granulometría en el suelo, las modificaciones de humedad y la cohesión de los depósitos se ven ampliamente afectados, manifestándose cambios bruscos de altura en pocos metros dentro de los dominios geomorfológicos de desembocadura y en la cabecera norte principalmente.

6.4 Correlación estadística y validación final de las propuestas para reformulación de factores

La base de datos de las 84 muestras obtenidas desde las fases de descripción geológica y los cálculos de índice según las 4 fórmulas expone diferentes características y analogías respecto a la distribución del cálculo de IS realizados por este estudio.

Para un primer análisis, los datos dentro de la base fueron sometidos a una exploración estadística básica tanto de medidas de tendencia central como de las medidas de variabilidad o dispersión, incorporando posteriormente el análisis visual obtenido de las diferentes gráficas univariantes y bivariantes, con el objetivo de la definición de semejanzas y discrepancias entre las ponderaciones de la metodología columnar y este trabajo, respecto al cálculo de índice de susceptibilidad de remociones en masa. Además, se incorpora un subcapítulo de análisis bivalente entre el factor antrópico y el factor de IS, para la sugerencia final de definición de unidades críticas para la prevención y posible desestabilización de laderas.

6.4.1 Estadística básica

Para finalizar el análisis de la distribución de los datos y el error contemplado por cada formulación, se realizaron diagramas de caja y bigotes para la presentación visual y descripción de la dispersión y la simetría de la base de datos en general. Además, dada las claras evidencias que otorgan estos gráficos, se pueden realizar algunas propuestas preliminares para la definición formal y final de los dominios geomorfológicos propuestos en Quebrada Tarapacá – Santa Rosa, incorporando los argumentos de la caracterización geológica final de las unidades geomorfológicas en Cuestión.

Los histograma de distribución normal entregan las frecuencias agrupadas de unidades geomorfológicas respecto al IS calculado, en este caso, un procesamiento del carácter geológico de las unidades geomorfológicas hacia una ponderación numérica. Esta distribución fue estandarizada, lo que significa que el eje X es separado en los intervalos equitativos.

En este caso, se notan las morfologías de campanas tanto simétricas como asimétricas dentro de los diferentes histogramas realizados, donde la forma (ya que es una distribución normal) indicará si será la media o mediana el valor más correcto para definir la cuantificación numérica de las diferentes formulaciones. Además, estas gráficas deben ser relacionadas finalmente con gráficos boxplot para obtener visualmente la agrupación y dispersión que generan las diferentes fórmulas.

Si se analiza la distribución de datos respecto al eje de simetría en la formulación columnar utilizada por este estudio (Figura 6.9), se aprecia claramente como se distribuye el IS de forma casi simétrica unimodal. Es de notar ante esta afirmación, sin embargo, que los rangos deben presentar una equidad en ambas partes del histograma para poder hacer alusión y esta característica, y en el caso de la primera formulación, los frecuencia de las unidades geomorfológicas respecto al IS son agrupadas levemente sobre el 50% de susceptibilidad de flujos de detritos, generando una concentración de asimetría negativa y dando un mayor valor de importancia a la mediana, aparejadamente con la tabla de exploración estadística descriptiva localizada en la base de datos de las unidades geomorfológicas de Quebrada Tarapacá – Santa Rosa.

Finalmente, se puede definir que la formulación columnar de Lara y el cálculo de IS realizado por estas ponderaciones otorga un índice de susceptibilidad medio a las unidades de forma general.

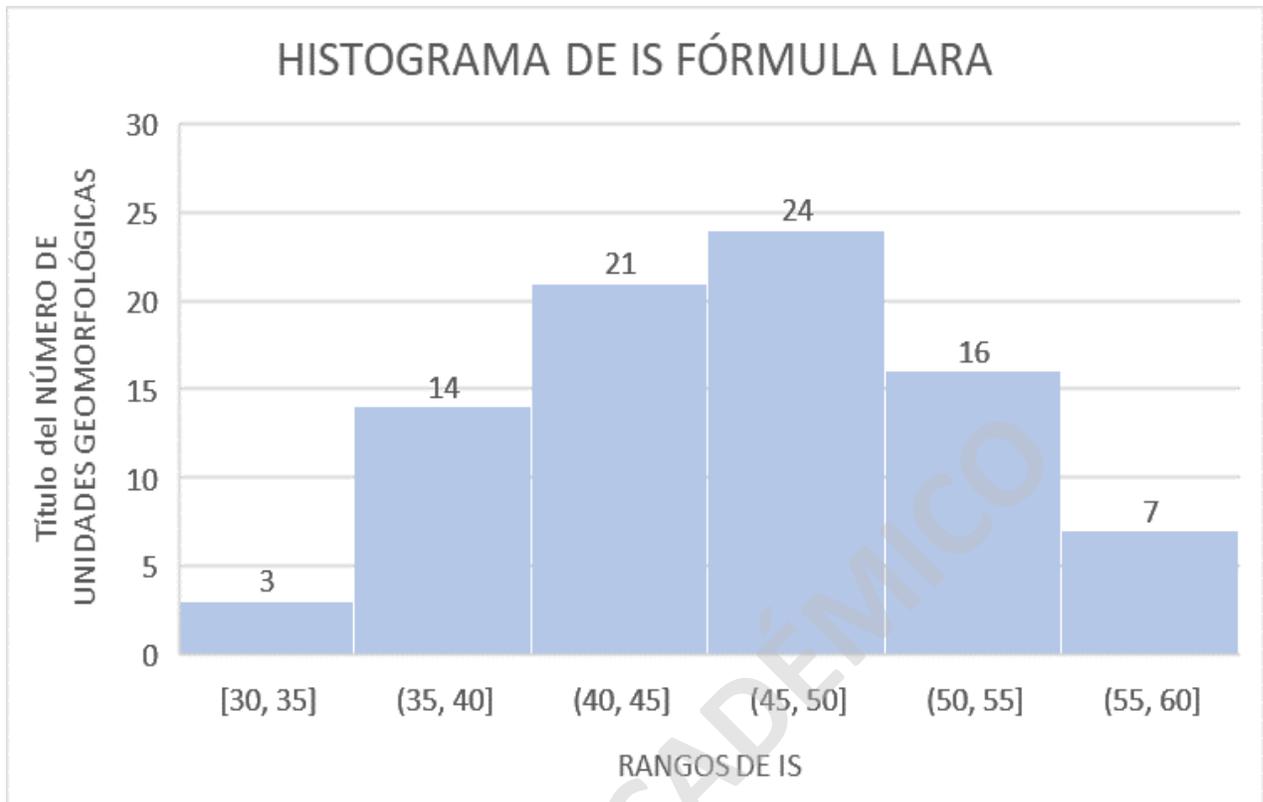


Figura 6.9: Histograma por rangos de frecuencia respecto al cálculo de IS obtenidos desde la formulación columnar.

Respecto a las formulación validada A (Figura 6.10), se puede apreciar una concentración claramente asimétrica disponiendo de más de la mitad de las unidades con un IS sobre los 45 puntos, lo cual contrasta correctamente con el coeficiente asimétrico de mayor magnitud. La gráfica da más evidencia de como la formulación A sectoriza al cálculo de IS mínimo sobre los 40 puntos, solamente equiparando el peso del factor antrópico a una segunda posición de jerarquía.

La gráfica del histograma presenta una clara sectorización del cálculo de IS sobre los 35 puntos y hasta los 60, manteniendo el delta más bajo entre todas las propuestas.

La formulación A preliminarmente mantiene una homogeneidad estadística que se representa en los productos geológicos visuales, lo que se puede llegar a explicar con el principio de homogeneidad para la definición de unidades geomorfológicas definido por Lara (2007), haciendo caso a que dado la baja escala de la cuenca hidrográfica (4 km.), las laderas no debiesen presentar variaciones importantes del IS según cada porción. Es decir, las laderas de cabecera, porción central y desembocadura presentan IS equitativos para cada macrodominio según la formulación A.

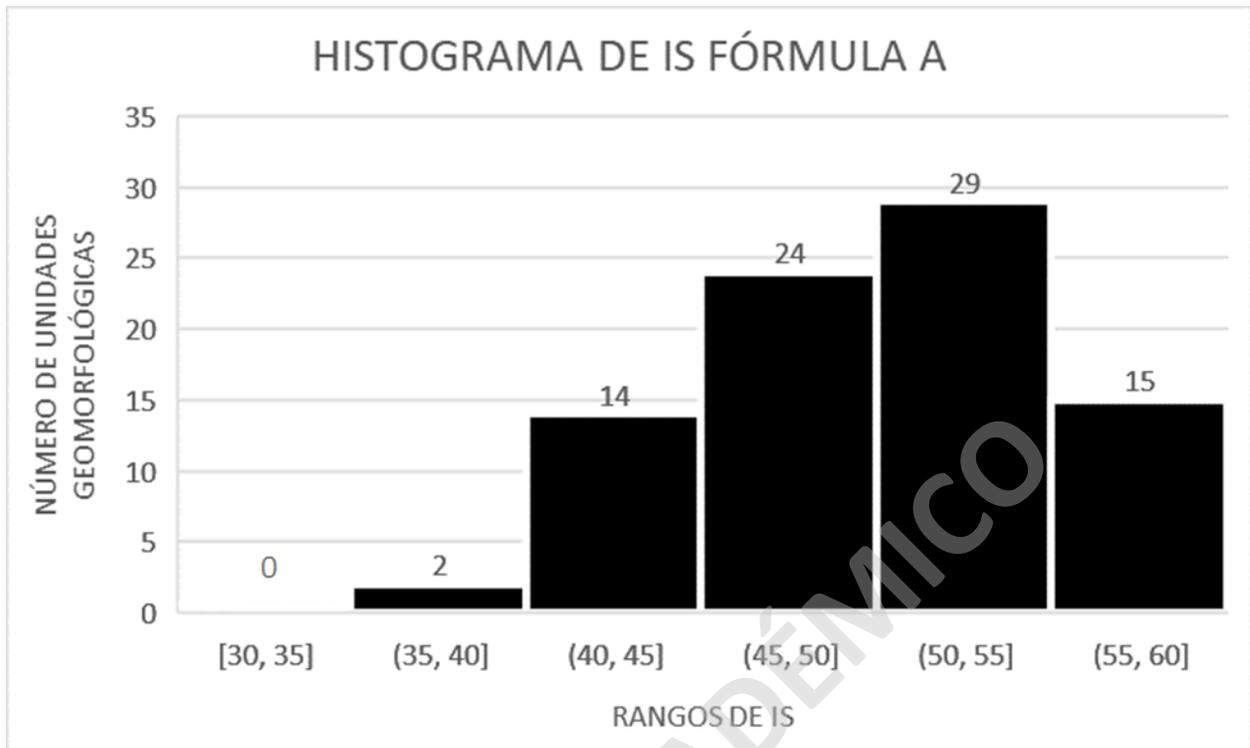


Figura 6.10: Histograma por rangos de frecuencia respecto al cálculo de IS obtenidos desde la formulación A.

Respecto a las formulaciones propuestas pero que no pasaron la validación, se pueden anexar aquellos datos de variación obtenidos dentro de la exploración básica, donde la formulación B por ejemplo (Figura 6.11) marca una asimetría más positiva respecto a las demás con claras concentraciones de unidades con IS entre 35 y 50. Esto indica una leve variación respecto a la generalidad entre las demás ponderaciones, produciendo números de susceptibilidad mucho más bajos pero también con unidades geomorfológicas con IS mayores, lo que extiende la dispersión de los datos respecto a la media en este caso, por presentar asimetría positiva.

La formulación C por otra parte (Figura 6.12) concentra las frecuencias de forma similar a los IS de la reponderación A, esto graficado previamente tanto en los porcentajes de validez de los mapas como en las unidades geomorfológicas caracterizadas con susceptibilidad alta, de las cuales solo 9 no aparecen catalogadas como unidades dentro de estos rangos. Además, ambos histogramas contemplan una clara asimetría negativa, pero difieren principalmente en la amplitud del rango.

Esto quiere decir finalmente que la formulación A y la formulación C contemplan mucha similitud en la distribución de los IS y, por ende, la jerarquización en C puede ser ajustable levemente para obtener un cálculo más sobrestimado, pero con un rango de datos más acotado respecto a la cuenca.

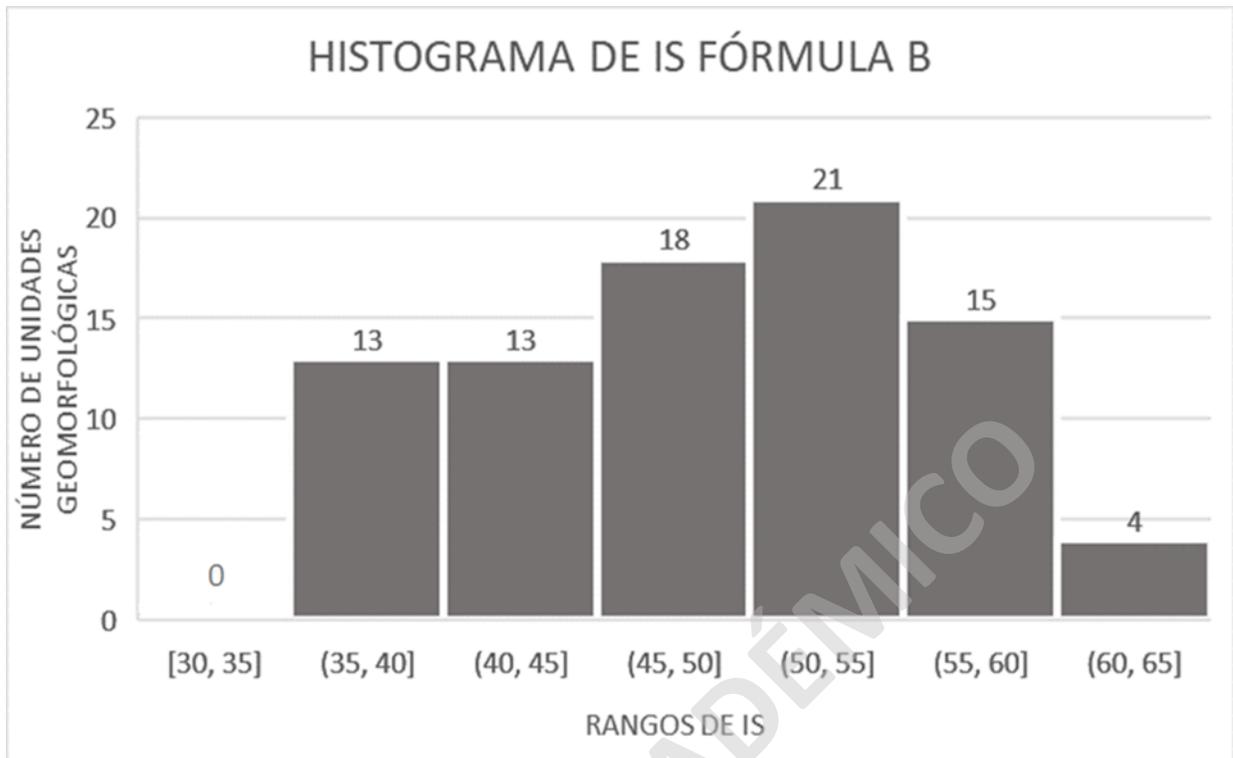


Figura 6.11: Histograma por rangos de frecuencia respecto al cálculo de IS obtenido desde la formulación B.

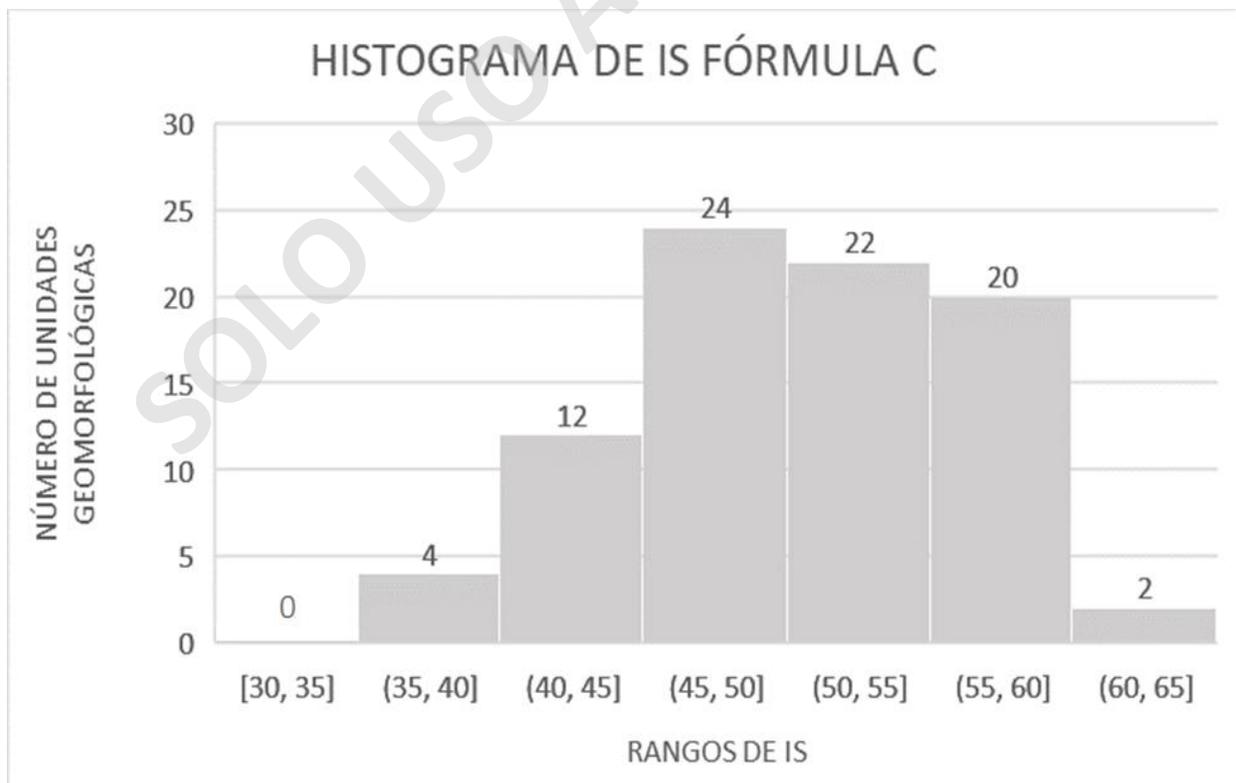


Figura 6.12: Histograma por rangos de frecuencia respecto al cálculo de IS obtenido desde la formulación C.

Tal y como se puede apreciar en la figura 6.13, los recorridos intercuartílicos son bastante diferente entre sí, esto graficado por los diferentes mínimos y máximos entregados por las fórmulas. Se visualiza preliminarmente desde la fase de la exploración estadística de la base, sólo la formulación B y C presentan una asimetría positiva, concentrando los datos bajo el 50% de IS.

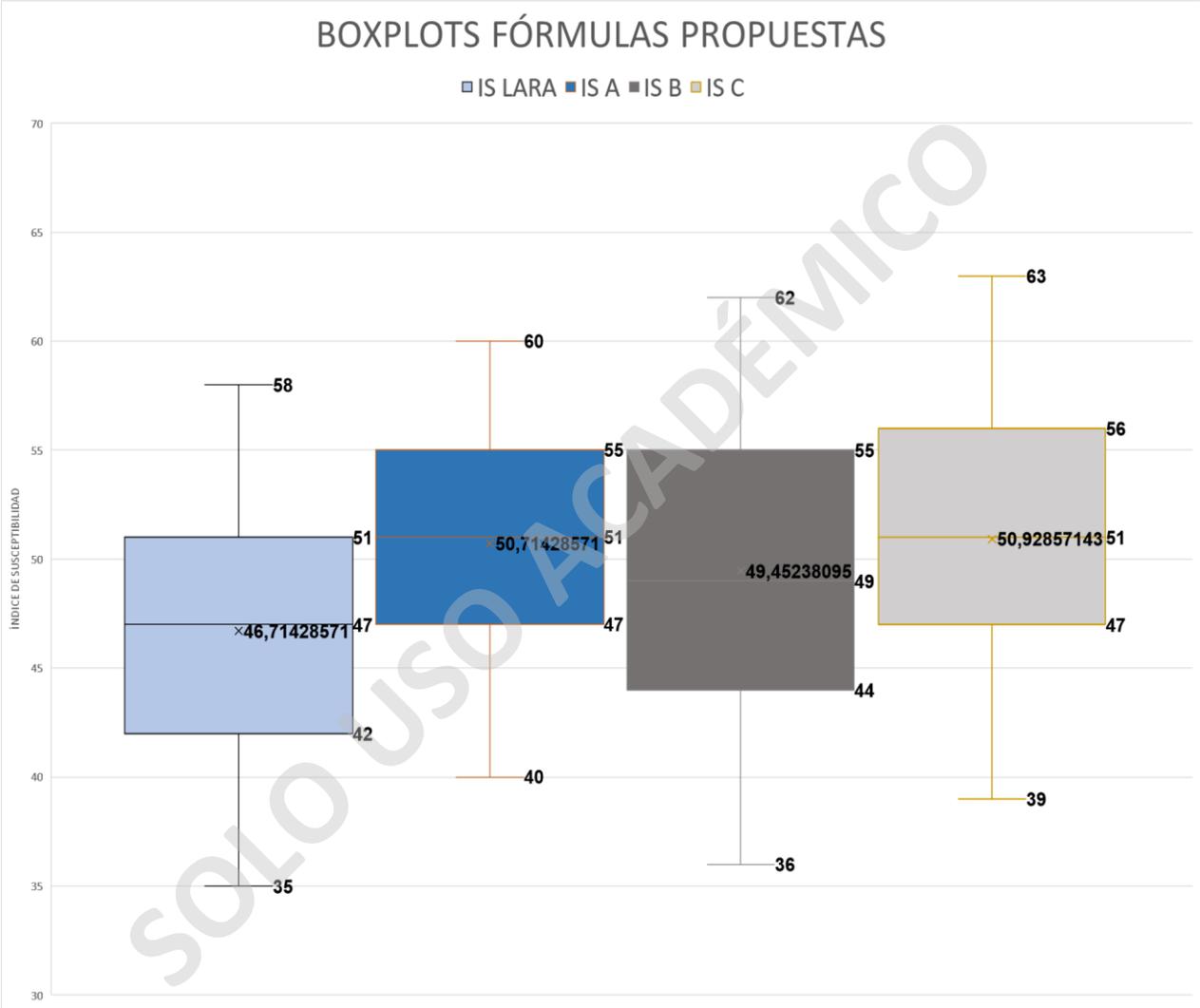


Figura 6.13: Diagramas de cajas y bigotes (boxplot) respecto a la dispersión y concentración de la base de datos de IS.

Además, se puede evidenciar como la fórmula válida A presenta el menor recorrido y, por ende, la menor dispersión de los datos, con una mediana sobre los 50 puntos y los datos concentrados entre el tercer y último cuartil. Este efecto no se produce en la formulación columnar, sin embargo, presentando las mayores dispersiones intercuartílicas hasta el segundo cuartil, pero con concentraciones entre los rangos de los 45 puntos a 56 puntos.

Hablando de los datos extremos o anómalos, estos se pueden visualizar previamente dentro de los datos de mínimos y máximos, incluyendo el error típico y la desviación de dispersión de las diferentes poblaciones. Se puede apreciar que la diferencia entre el primer y segundo rango intercuartílico de todas las fórmulas generalmente presenta 8 o 7 puntos de diferencia, con máximos alcanzando una diferencia entre 6 y 7 puntos respecto al final del 3er cuartil, generando que el error típico y la desviación estándar de la base aumente en las formulaciones con mínimos muy bajos y máximos muy altos dispersando las muestras, tal y como ocurre en B y C.

La formulación A es la ponderación que presenta el menor rango intercuartílico respecto a los valores anómalos, alcanzando diferencias entre los 7 y 5 puntos, Esto quiere decir que el menor cálculo de IS posible para las unidades geomorfológicas utilizando a la formulación A puede entregar probabilidades de desestabilización con dificultades para caracterizar unidades con IS bajo. La reducción de los valores anómalos hacia las zonas superiores, sin embargo, marca la tendencia de concentración en unidades geomorfológicas hasta los 60 puntos, produciendo un sesgo importante de la sobrestimación ante los valores de IS que sobrepasen los 65 puntos (según la gráfica).

La formulación A si bien presenta dificultades para calcular valores de IS bajos, la ponderación y ordenamiento de factores tiene la capacidad de calcular un índice más bien homogéneo para las diferentes porciones de la cuenca, aumentando la probabilidad de desestabilización en sectores que presenten intervención antrópica o que se encuentre cercanos a estas, sin sobrestimar los cálculos con caracterizaciones anómalas.

Finalmente, la reponderación A entregada por este estudio comprende bastante bien el concepto de homogeneidad lateral de las laderas propuestas en las investigaciones de remociones en masa, con un rango intercuartílico visiblemente simétrico y sin mucha deformación indicando una variación de aumento de IS según el factor dominante de cada dominio, es decir, los dominios geomorfológicos están representando el factor que condiciona de mayor forma la estabilidad de una ladera, manteniendo un IS y una colorimetría constante en el mapa.

Para finalizar con el análisis y entregar la mejor evidencia respecto a las diferencia entre la formulación columnar de Lara (2007) y las propuestas realizadas en este estudio, se entregan los valores respecto al coeficiente de correlación de Pearson para caracterizar de forma más particular la validez de las fórmulas. Este coeficiente permite analizar y cuantificar la relación lineal que tendrán 2 variables. En este caso, se realizan las comparaciones entre los índices de susceptibilidad

respectivos a la formulación columnar y las diferentes reponderaciones propuestas, con enfoque en la similitud entre la formulación columnar y fórmula válida A para así definir finalmente si la formulación y su ponderación metodológica presenta una real validez para el análisis de susceptibilidad de flujos de detritos mediante la comparación de equidad entre las propuestas.

Los coeficientes de correlación respecto a la formulación columnar (Tabla 6.1) difieren entre sí y dejan en evidencia la directa relación de la Fórmula A. La fórmula al presentar una correlación del 0,98 indica que existe una relación perfecta entre las variables comparadas, y que la relación respecto al cálculo de IS en ambas es directamente proporcional, superando en la comparación a las fórmulas B Y C.

Tabla 6.1: Coeficiente de correlación respecto a las propuestas de reponderación.

Propuestas de reponderación	Coeficiente de correlación respecto a la formulación columnar
FÓRMULA A	0,98039906
FÓRMULA B	0,87158217
FÓRMULA C	0,86121519

Sin embargo, B y C también presentan una relación directamente proporcional pero más imperfecta, alcanzando coeficientes de 0,87 principalmente. Esto indica que todas las propuestas presentan una buena correlación con la formulación columnar de Lara (2007), principalmente asociado a los pocos cambios en la distribución de factores condicionantes y sus ponderaciones respectivas.

La formulación A dentro de las propuestas es la que comprende los menores cambios, solamente aumentando el peso del factor antrópico dentro de la jerarquía. Las otras formulaciones pierden correlación producto de las modificaciones importantes asociadas tanto al factor antrópico como el factor climático-vegetativo.

Uno de los aspectos relevantes que se debe ejecutar es la comparación de la dispersión respecto a las condiciones geológicas de las laderas dentro de la cuenca, ya que este cálculo puede indicar ciertas regularidades o errores de la caracterización y su ponderación respectiva. La subdivisión de los diferentes dominios geomorfológicos dentro de la cuenca definidos para Quebrada Tarapacá – Santa Rosa comparten visualmente índices de susceptibilidad bastante similares debido a la convención de la predominancia de diferentes factores geológicos y/o geomorfológicos en zonas

con una condicionalidad similar, es decir, dentro de las unidades se preserva un cierto tipo de homogeneidad respecto a las condiciones geológicas-geotécnicas y geomorfológicas asociada a la posición de exposición solar, por ejemplo, el factor de pendiente de ladera y/o la presencia del factor antrópico. Esta puede ser de las principales razones por lo cual ninguna de las fórmulas presenta un error anómalo, indicando que la cuenca presenta grados de susceptibilidad bien marcados dentro de dominios geomorfológicos específicos.

Esta homogeneidad teórica entre las diferentes porciones de la hoya debe relacionarse también con el tipo de reformulación realizado, donde la fórmula A evidencia ser la propuesta con el cálculo de IS más homogéneo respecto a las demás, esto gracias a su reponderación equitativa. En base a esto, los cambios en el error típico nos pueden indicar que si bien todas las fórmulas son correctamente aplicables y no tan diferentes entre sí, solo la formulación A mejora la resolución del peligro en las diferentes zonas, marcando una disminución del error producto del aumento en el número de muestras descritas con la variable del factor antrópico, las cuales presentan un IS mayor y aumentan la frecuencia relativa de unidades geomorfológicas sobre el 50% de susceptibilidad de flujos de detritos.

Dadas las asimetrías negativas presentes en los diferentes cálculos, la mediana obtenida de la base de datos actúa como el valor más idóneo para representar el IS de las unidades geomorfológicas respecto a la formulación columnar y la propuesta C, exponiendo un efecto de subestimación de las media. El menor coeficiente de asimetría calculado fue obtenido por la formulación B, la cual presenta una tendencia a presentar una dispersión simétrica, es decir, la acumulación de las muestras se presenta en los índices de susceptibilidad de 40 y 60 puntos. Esto puede estar particularmente asociado a los amplios rangos de susceptibilidad obtenidos por la reformulación de factores de esa propuesta, pero también se pueden asociar asimetrías (por más mínimas que sean) en diagramas boxplot con una mejor resolución del ordenamiento de los datos.

La fórmula A presenta la mayor asimetría, donde se presenta un efecto de concentración de datos de unidades sobre el 50% de susceptibilidad respecto a todos los demás, esto confirmado además por el cálculo de porcentaje de área respecto a los diferentes niveles de peligro calculados para la hoya.

Finalmente, todas las fórmulas presentan esta concentración de unidades con un IS alto y esto es justificado en base las descripciones visuales geológicas y geotécnicas realizadas por este estudio, donde existen porciones de la cuenca con un sustrato medianamente o poco consolidado, con

presencia de alteración antrópica ya se geomorfológica o en el factor de humedad y con cercanías menores a los 2 km respecto a sistemas de falla con sismicidad activa.

Este efecto y lo expuesto en este capítulo es visible además dentro de los diferentes histogramas realizados y los diagramas boxplot, donde se pueden revisar las diferentes concentraciones de datos sobre las gráficas. Además, dentro del subtítulo de gráficas también se puede encontrar la medida de variabilidad del coeficiente de correlación entre la formulación columnar y las reponderaciones propuestas por este estudio, con la representación visual y análisis de la similitud entre las fórmulas.

Para evidenciar de mejor manera estos números, los siguientes scatterplot grafican estas ideas mediante la correlación de los diferentes índices de susceptibilidad, con regresiones lineales y el error asociado a esta curva. Estos puntos permiten la detección de direcciones de anisotropía, variabilidad de la distancia, las diferentes zonas de influencia y su correlación espacial.

Comenzando la comparación entre la formulación columnar y la fórmula válida A (Figura 6.14), se aprecia una correlación perfecta (pendiente de la regresión casi en 45°), con un coeficiente de error de 0,96 que marca la validez de esta regresión.

Los valores con menores distancias respecto a la regresión se encuentran ubicados en los primeros rangos, las cuales comienzan a dispersarse de las unidades con cálculo de IS sobre 45. Estas distancias son poco extensas, indicando que la correlación entre la formulación A y la formulación columnar es perfecta pero no al 100%, manteniendo diferencias más significativas al momento de calcular índices más altos.

Estas diferencias significativas en las unidades mayor índice de susceptibilidad puede explicarse por la modificación en la ponderación de factores condicionantes, ya que al modificar levemente uno de los factores predominantes se dio espacio al factor antrópico para subir finalmente (en base a la caracterización geológica y visual de las laderas que fueron incorporadas al cálculo como evidencia real del impacto humano) el IS en aquellas laderas que presentasen actividad antrópica, condiciones geomorfológicas favorables y condiciones geotécnicas críticas o favorables a la desestabilización, tal y como la ladera 74 o la ladera 44 en la porción de cabecera.

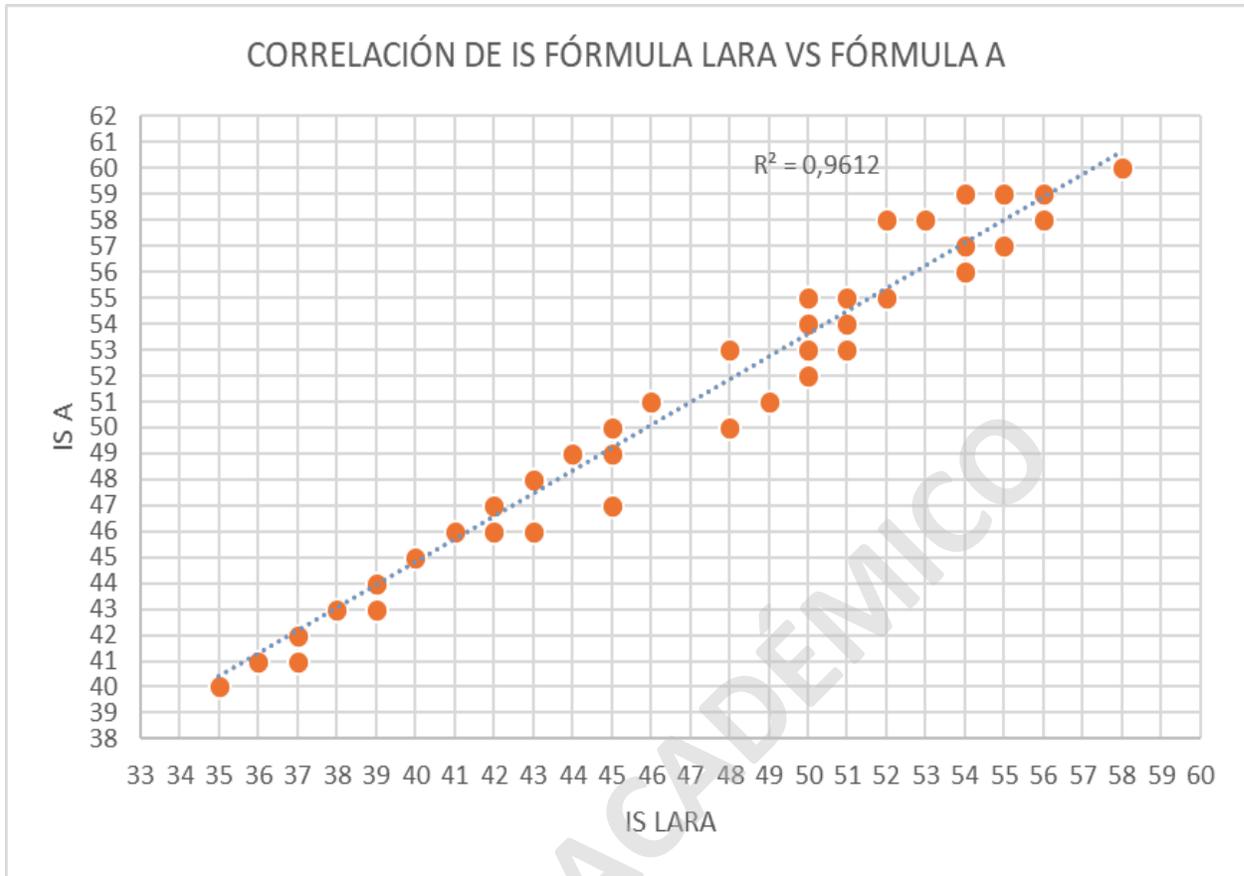


Figura 6.14: Gráfico de correlación del cálculo de IS respecto a la formulación columnar y la propuesta A.

Respecto a la correlación entre la formulación columnar y la propuesta B (Figura 6.15), se puede contemplar significativas diferencias respecto al cálculo de IS, manteniendo tanto dispersiones bajas en los cálculos de menor IS como dispersiones altas en los rangos de mayor índice. La regresión lineal comprende un error del 0,75 justificando la diferencia en los coeficientes de correlación numéricos obtenidos previamente.

Nótese la gran diferencia entre los cálculos realizados para aquellas laderas con condiciones geomorfológicas y geotécnicas de inestabilidad, efectuando el efecto de sobrestimación de IS y subestimación de IS en las laderas naturales.

La formulación B finalmente no representa el objetivo de reponderación necesario para este estudio, principalmente producto de la desvalidación según la metodología de Muñoz (2018) y los índices de susceptibilidad con demasiadas variaciones para una cuenca hidrográfica tan pequeña.

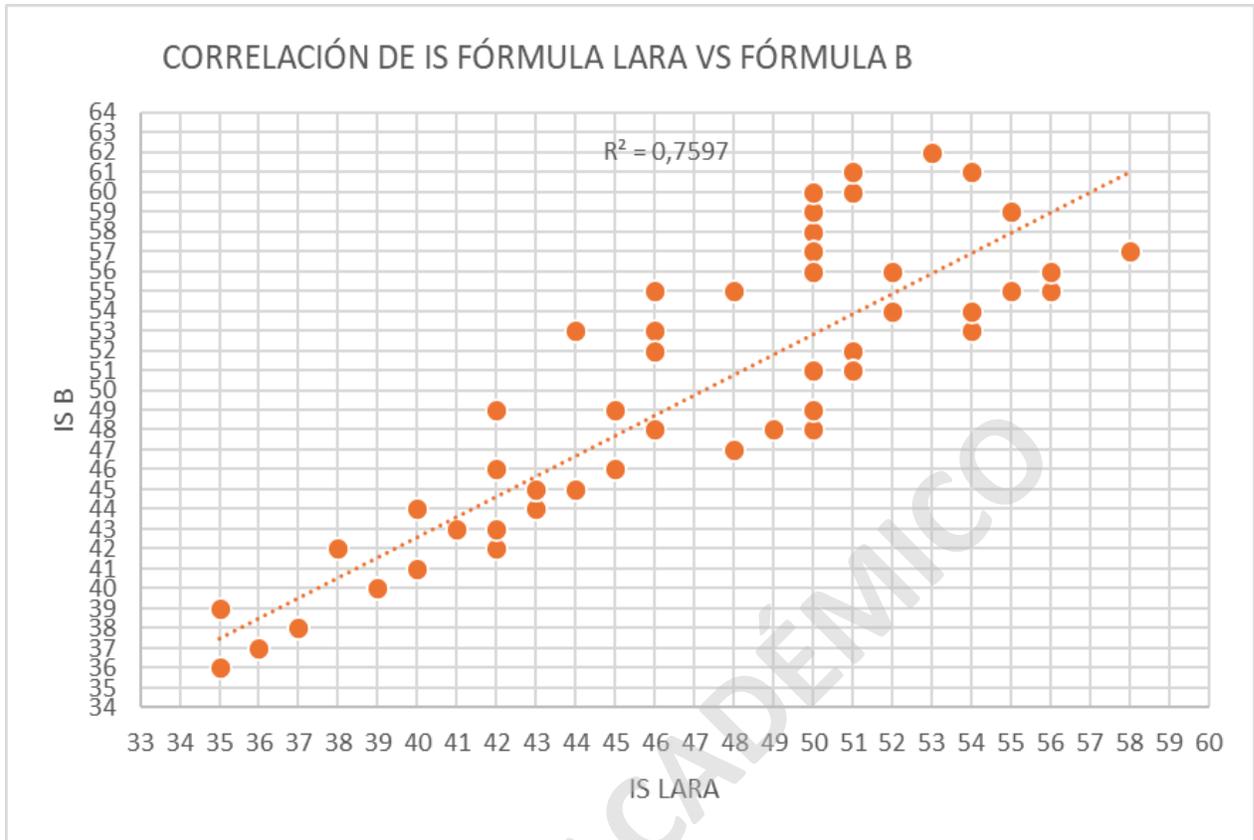


Figura 6.15: Gráfico de correlación del cálculo de IS respecto a la formulación columnar y la propuesta B.

La formulación C por otro lado (Figura 6.16) se presenta como la fórmula con peor correlación marcando un error de 0,74 y con amplios rangos de dispersión a lo largo de toda la regresión lineal, aumentando levemente en los rangos de IS sobre 50. Gracias a esta información, la correlación de validez preliminar entre la formulación A y C puede quedar descartada ya que queda en evidencia las diferentes sobrestimaciones del cálculo de IS, marcado en la tendencia de dispersión de los puntos sobre la curva de regresión y no por debajo de esta. La fórmula A presenta concentraciones bien apegadas a la regresión lineal efectuada, marcando una clara diferencia respecto a los cálculos del índice de susceptibilidad de los datos mediante la reponderación C.

La formulación C finalmente no representa el objetivo de reponderación necesario para este estudio, principalmente producto de la desvalidación según la metodología de Muñoz (2018) y los índices de susceptibilidad con demasiadas variaciones para una cuenca hidrográfica tan pequeña.

Contemplando todos los resultados obtenidos y la evidencia visual entregada tanto por los gráficos como por la estadística descriptiva, se puede hablar de forma mucho más crítica respecto a las diferentes propuestas de cálculo realizadas en este estudio.

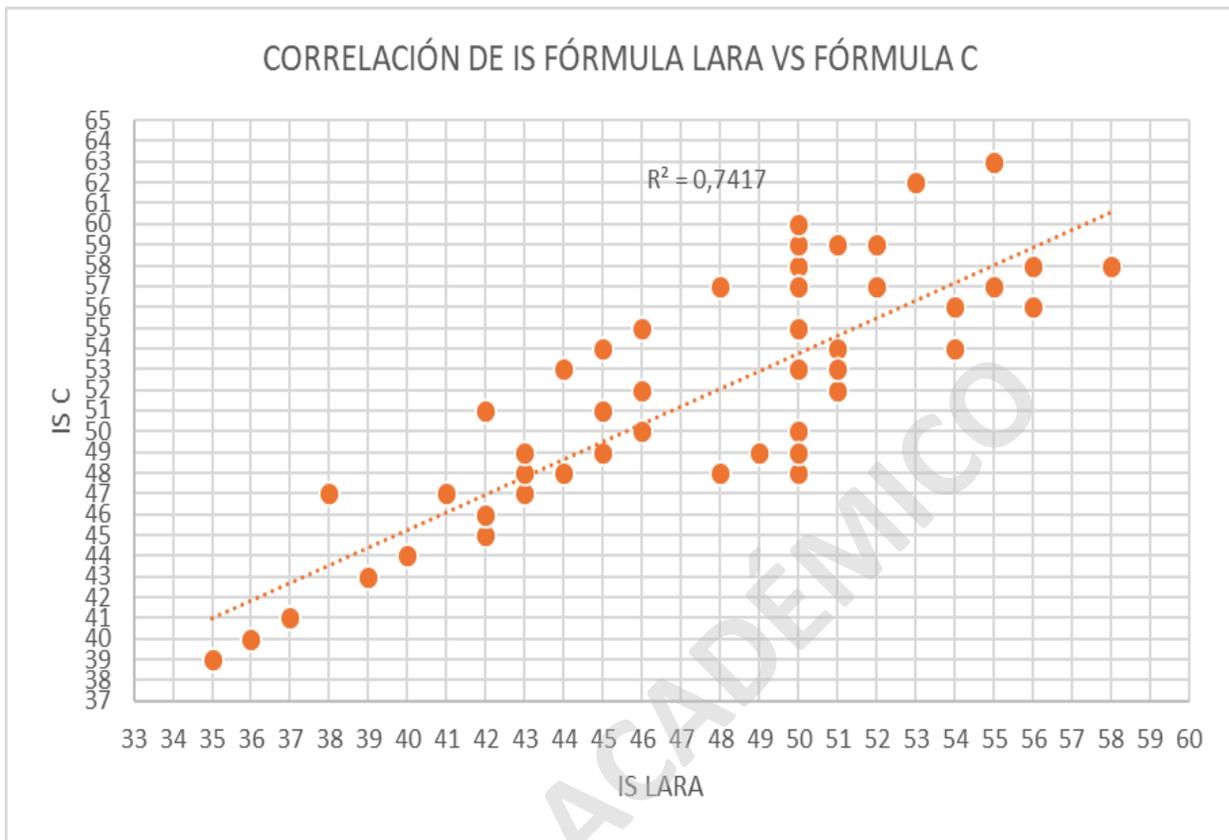


Figura 6.16: Gráfico de correlación del cálculo de IS respecto a la formulación columnar y la propuesta C

Primeramente, las diferentes formulaciones presentes en este estudio mantienen la distribución homogénea del IS respecto a los diferentes dominios geomorfológicos, lo que implica descripciones geológicas realistas y que no alteran el puntaje aumentando o subestimando el IS.

La formulación columnar contempla un cálculo subestimado del IS, con cálculos esperados en rangos más amplios y heterogéneos pero concentrados bajo el 50% del puntaje de las unidades, marcando unidades geomorfológicas con una probabilidad de desestabilización media principalmente en las cuencas. La formulación más válida propuesta por este estudio y con la cual se puede comenzar a definir las posibles actualizaciones a realizar en el futuro es la propuesta A, contemplando la mejor dispersión de los datos respecto a las reformulaciones realizadas a la metodología columnar, apeándose a los valores de IS preliminares. Esta formulación realiza una evidente sobrestimación del IS en aquellas unidades que se encuentran a partir de los 45 puntos, pero obteniendo rangos muy acotados, y sin anomalías importantes.

7 Conclusión

7.1 Inferencias finales.

Este estudio concluye, geológica y metodológicamente hablando que:

Los países cuyos territorios están contruidos sobre o adyacentemente a cordones montañosos presentan una alta probabilidad de desencadenamiento y desarrollo de remociones en masa, dada tanto por las condiciones geotécnicas y estructurales que controlan al relieve como por la posición geográfica y la climatología cambiante producto de la afectación hacia ciclos hídricos y de flora.

Climatológicamente, el calentamiento global y el cambio del ciclo hídrico (acelerado por parte del agente humano, entre otros) es el catalizador del aumento en la frecuencia de precipitaciones en sectores piemontinos de América Latina, provocando intensos fenómenos aluvionales dentro del cordón montañoso de Los Andes y en cuencas a menor altura, desde el centro y sur del continente.

Gracias a la alta probabilidad de desencadenamiento de aluviones en América Central y América del Sur, se ha logrado una convención de los factores que condicionan la estabilidad y remoción de las unidades de ladera respecto a flujos de agua superficiales en las regiones, para estudios de prevención y mitigación del peligro geológico dentro de las hoyas, los cuales son: factor geológico; factor geotécnico; factor geomorfológico; factor antrópico; factor climático y factor de vegetación.

Los principales factores condicionantes dentro del continente que supeditan la desestabilización de las laderas y el aporte sedimentario es el factor geomorfológico y el geológico-geotécnico, es decir, tanto las características morfológicas y de geoposición como la composición y propiedades del material sedimentario desarrollado sobre las cuencas y los cauces respectivos de las unidades.

Los factores condicionantes menos influyentes definidos respecto a la desestabilización y aporte sedimentario es el factor antrópico y el climatológico-vegetativo, siendo este último obviado en algunas metodologías americanas con cálculos jerárquicos de susceptibilidad de flujos de detritos.

Estos factores han sido jerarquizados de esta forma para poder realizar cuantificaciones numéricas simplificadas respecto a la predominancia de las diferentes características presentes en la desestabilización de una ladera, y así, describir visualmente zonas de potencial peligro geológico.

El estudio respecto a la cuantificación del impacto humano y la definición formal del evento del Antropoceno en América producto de los acelerados cambios en los ciclos naturales de la biosfera ha otorgado a la comunidad científica importantes evidencias respecto a las modificaciones en

ciclos geomorfológicos y sedimentológicos correlacionadas al factor antrópico, incorporando nuevas conceptualizaciones y visiones referidas a la cuantificación del efecto del humano, donde además se ha definido al factor antrópico como un agente condicionante predominante sobre la estabilidad de suelos, laderas y quebradas en ciertas porciones del relieve altamente urbanizadas.

El factor antrópico puede influir directamente en la modificación de los factores geomorfológicos, geotécnicos y climáticos de las laderas, afectando principalmente a: la cohesión y tensiones superficiales del sustrato; la humedad presente en el suelo y la exposición solar de una unidad; la obstrucción de los canales de drenaje y la geomorfología de estos; la población de vegetación y la condición subaérea por procesos de deforestación; la presencia natural de la línea de nieves sobre las unidades geomorfológicas a una mayor altura, entre otros.

En Chile, el relieve de las diferentes subdivisiones regionales está construido predominantemente por geoformas estructurales de piedemonte asociado a sistemas de falla, con dominios geomorfológicos de extensas hoyas hidrográficas o sistemas de escorrentía esporádicos de una menor envergadura, siendo su territorio definido como una zona muy susceptible a desarrollar eventos de remociones por las diferencias energéticas y el posterior desarrollo de sedimentos.

En Chile Central se presentan condiciones muy favorables a desarrollar eventos de remociones en masa y la susceptibilidad de flujos de detritos es alta, no solamente por el ambiente estructural sino también por presentar actualmente temperaturas y precipitaciones cambiantes en cortos periodos de tiempo que pueden afectar a las diferentes tasas de volumen respecto al ciclo hídrico local.

Los eventos de flujos de detritos en Chile Central pueden presentar diferentes niveles de energía y una inesperada capacidad de alcance respecto a la intensidad de los eventos. Por esta razón, los dominios geomorfológicos en el sector han sido catalogados con niveles altos de peligro y riesgo de desestabilización desde las cabeceras, en casi la totalidad de las cuencas.

Localmente hablando y dadas estas condiciones, el piedemonte andino entre las comunas de Las Condes y La Florida ha sido estudiado exhaustivamente, donde se han definido previamente zonas con un peligro y riesgo geológico de desastres alto, con estudios cualitativos, cuantitativos y mixtos, incluyendo modelos predictivos y diversas metodologías de jerarquización probabilística.

Dentro de estos estudios, las metodologías locales para la evaluación de susceptibilidad de flujos de detritos y los cálculos de índices de susceptibilidad asociados a estas son llevados a cabo en base a una jerarquización de factores condicionantes posiblemente desactualizada producto de la modificación y la predominancia del factor humano en la desestabilización de laderas y

susceptibilidad de flujos (presente en estudios internacionales), siendo el factor geológico-geotécnico y geomorfológico como los caracteres predominantes para definir la condicionalidad de estabilidad de una ladera solamente, subestimando la predominancia del agente humano.

Los eventos geológicos identificados y la intervención antrópica llevada a cabo sobre las geomorfologías ubicadas en las curvas de nivel más bajas de las diferentes cuencas hidrográficas en estas comunas crean la necesidad imperativa de reactualizar los cálculos de índice de susceptibilidad de aluviones y la zonificación del peligro y riesgo de desastres en el área, mediante metodologías que incorporen un análisis más exhaustivo del impacto de la raza humana sobre la estabilidad de las laderas y que provean así nuevos antecedentes para la prevención y mitigación.

El estudio y análisis de la susceptibilidad de remociones en masa en el sector suroriente de la provincia de Santiago, más localmente en el sistema Tarapacá – Santa Rosa corresponde a un trabajo metodológico de caracterización heurística-jerárquica de los diferentes factores que condicionan la estabilidad de las laderas del piedemonte andino en la Región Metropolitana. La base y el sustento formal de esta propuesta comprende a los trabajos de: Sepúlveda (1998); Lara (2007); Lara y Sepúlveda (2010); Muñoz (2013); Ceballos (2016); Celis (2018); Muñoz (2018) y Lara et al.,(2018), donde se aplica una reformulación de la conceptualización del factor antrópico, se incorpora el factor condicionante de desestabilización de ladera respecto a la distancia a zonas de falla y se incorpora además el factor climático de humedad dentro del factor humano. Además, se realiza un inventario descriptivo de las diferentes formas de impacto humano sobre las laderas y se correlaciona posteriormente tanto con la descripción en terreno como el cálculo de índice de susceptibilidad respectivo a la unidad geomorfológica

El objetivo de esta reformulación comprende el estudio de las alteraciones a los factores naturales que condicionan la estabilidad de laderas respecto al impacto humano, aplicando 2 diferentes fases metodológicas que contemplan la descripción geológica de la hoya hidrográfica y la cuantificación numérica de esta caracterización respectivamente. Los datos son integrados a la caracterización resultante mediante el cálculo de índice de susceptibilidad, metodología que utiliza la jerarquización de los factores naturales condicionantes y procede mediante el cálculo de un índice de susceptibilidad. Este estudio propone 3 reformulaciones diferentes (Propuesta A, B y C) respecto a la formulación original de Lara (2007), para cuantificar y visualizar (mediante mapeo y superposición de imágenes) el efecto humano sobre las laderas, como afecta a la estabilidad geotécnica in situ y cuál es su predominancia respecto al cálculo de índice de susceptibilidad.

Quebrada Tarapacá – Santa Rosa se presenta construida por la Formación Abanico, con una exhumación en la porción oriental del polígono. El relieve que se encuentra construido principalmente por la exhumación de las rocas de Abanico también está construido por depósitos de remociones en masa, principalmente abanicos aluviales. La morfología como tal se encuentra dominada por el sistema de falla regional Pucuro, específicamente a la porción central de la traza de San Ramón. La cuenca es definida como una red esporádica, y los últimos antecedentes de flujos de detritos en la zona son prehistóricos (Últimos episodios interpretados en el Holoceno superior). El desarrollo de suelo y las condiciones geotécnicas de las laderas es estable, pero la cuenca presenta diferentes tipos de alteración que modifican la naturalidad en las tensiones y la humedad principalmente. Las zonas más propensas a desestabilización se presentan tanto en las laderas de desembocadura norte como en las ubicadas a mayor altura, dentro de la cabecera de la hoya. Todas las unidades de ladera presentes en la zona baja y media de la cuenca que presentan una desestabilización clara comprenden al menos 1 tipo de impacto humano a la ladera.

La Región Metropolitana y su población está llevando a cabo un proceso de expansión inmobiliaria y modificación antrópica activa sobre las diferentes geomorfologías que son encontradas en el relieve de las diferentes provincias que componen el perímetro continental de esta, el cual ha estado sectorizado principalmente hacia el sector suroriental de la región, aumentando exponencialmente el riesgo de desastres y también posiblemente el peligro geológico dentro de las cuencas y los ríos. El impacto humano en la cuenca es variado, presentándose en grados poco importantes en la zona de cabecera central y muy importantes en la porción de desembocadura y cabecera norte. La cuenca presenta principalmente fundaciones de infraestructura crítica bastante meteorizada e inestable.

Las 84 unidades geomorfológicas fueron subdivididas en 6 dominios geomorfológicos dominados por la exposición solar y ubicación respecto a la red principal. La caracterización geológica preliminar es utilizada para la correlación del cálculo de índice de susceptibilidad de la ladera, obtenido desde las 4 formulaciones. Se obtuvieron posteriormente 24 muestras en unidades críticas y naturales para la cuantificación de humedad tanto en unidades con condiciones estables como alteradas, para una correcta interpretación de los datos de humedad y el efecto antrópico en este.

Respecto a la validez de los cálculos de susceptibilidad de flujos de detritos para Quebrada Tarapacá – Santa Rosa, solo la formulación A consta de un cálculo válido para la probabilidad de desestabilización, esto según la propuesta de Muñoz (2018).

En base a esta reponderación, la cuenca presenta más de un 60% de superficie con una susceptibilidad de flujos predominantemente alta. Las condiciones geotécnicas de la cuenca y la correlación con la ubicación de las trazas antrópicas son evidentes al momento de hablar de la estabilidad. En los sectores bajos de la cuenca principalmente se presenta como norma una condición medianamente favorable a la desestabilización cuando existe una traza humana, con laderas intervenidas geomorfológicamente y con sustrato poco cohesionado, con presencia de escombreras de concreto y contenido rocoso que pueden desestabilizar la tensión natural de las unidades geomorfológicas. La zona de cabecera central y parte de la cabecera norte también se suman al área catalogada con susceptibilidades altas de desestabilización, principalmente asociado al factor climático y geomorfológico de las unidades.

Respecto a la subestimación de los índices de susceptibilidad, tanto la formulación columnar y la formulación B presentan cálculos bajos de IS, alcanzando los 30 puntos como mínimo.

Respecto a la sobrestimación de los índices de susceptibilidad, la formulación A presenta una clara sobrestimación respecto a la formulación columnar, diferenciándose principalmente en la corta amplitud de los rangos intercuartílicos desarrollados por la agrupación de IS. Esta formulación además presenta correlaciones perfectas respecto a la formulación columnar, obteniendo una amplia variedad de datos respecto al primer cálculo.

Quebrada Tarapacá – Santa Rosa y la actualización de las metodologías de evaluación de susceptibilidad de flujos de detritos comprende la integración de la totalidad de los antecedentes para el cálculo de índices de desestabilización de ladera, donde se calcularon y describieron de forma profesional e imparcial los diferentes factores condicionantes. En base a esto, la cuenca presenta un nivel de peligro de flujos bastante alto, reflejado por el cálculo de IS y la geotecnia.

La integración de los mapas de peligro geológico y la interpretación de estos presentan evidencias concluyentes respecto esta vez al riesgo asociado a la cuenca. Gracias a los diferentes mapas, se puede definir que la zona de desembocadura de Quebrada Tarapacá – Santa Rosa puede presentar las mayores pérdidas respecto a un evento de precipitaciones con intensidad muy alta, esto aludido a la confluencia de zonas de alcance catalogadas con peligro importante y las unidades geomorfológicas que presentan trazas antrópicas y efecto de alteración humana.

La adaptabilidad de esta propuesta metodológica respecto a las investigaciones anteriores es bastante buena, manifestada en los coeficientes de correlación y pocos errores típicos en la

distribución de IS, sin embargo, es importante concluir que la aplicación de estas propuestas debe ser siempre realizadas bajo la descripción crítica de profesionales asociados a las geociencias.

Respecto a propuestas de mitigación por alerta temprana, se puede definir que al menos el dominio geológico de desembocadura en su totalidad se ve amenazado por posibles desestabilizaciones tanto naturales como antrópicas, es por esto que se sugiere una sectorización de la prevención en la zona de confluencia de la Antropósfera y litósfera, asociado a los diferentes parques comunitarios del piedemonte de la precordillera de los Andes. Es de notar que muchas de las zonas planas (menores a 10°) han estado en disputa como recurso de suelo para la ocupación humana desde la expansión urbana ocurrida en los 2000. Este estudio y los mapas realizados por la integración de los antecedentes de la cuenca concluyen que la cuenca presenta niveles peligro y riesgo geológicos alto, con condiciones de inestabilidad evidentes, por lo que se sugiere mantener la sectorización de suelo respecto al ordenamiento territorial.

El piedemonte y los diferentes altos topográficos asociados a la provincia de Santiago presentan niveles de peligro extremadamente altos y la correcta evaluación de estos sectores puede promover la legislación de estas zonas, manteniendo la argumentación científica para la correcta ordenanza del uso de suelo. La provincia mantiene un procesos de expansión antrópica aún activa, pero los cambios en la legislación pueden eventualmente ralentizar el evento Antropoceno, al menos dentro del piedemonte asociado a la Región Metropolitana.

7.2 Comentarios de las metodologías de evaluación de susceptibilidad de remociones en masa y recomendaciones a futuro

Las limitantes para la correcta evaluación de la susceptibilidad nacen desde el objetivo de poder establecer la relación entre el aumento de la magnitud destructiva de los eventos de flujos de detritos y la gestión del riesgo de estos. Muchos de los antecedentes incorporados a las metodologías no bastan para la modelación básica de los diferentes índices calculados, y la breve interpretación de los números que no responden a condiciones homogéneas afectan de forma importante el análisis final de las diferentes correlaciones de factores condicionantes.

Para la realización de este estudio se empleó la comparación de imágenes satelitales que muestran la urbanización del sector con el paso de los años, los mapas de susceptibilidad de la zona frente a eventos de flujos de detritos, la revisión bibliográfica de este tipo de eventos en las quebradas y la descripción geológica de detalle dentro de Quebrada Tarapacá – Santa Rosa. A través de una

comparativa de datos de aumento poblacional se intentan realizar interpolaciones que en base a una población o muestra, son datos bastante poco relevantes ya que no representan una medición numérica como tal.

Las metodologías de jerarquización nacen con el defecto de ser subjetivas, esto debido a la infinidad de variables que se pueden correlacionar a la estabilidad de laderas, por lo que asociar una sola idea respecto al factor humano y los otros factores condicionantes puede ser muy errático si es que no se tiene evidencias suficientes, por lo que si una metodología cuenta con pocos datos, la descripción de la cuenca es netamente al ojo del profesional que la esté utilizando. Además, la jerarquía de los factores condicionantes en la susceptibilidad de flujos también sigue siendo difusas respecto a las ubicaciones de los estudios donde se realizan. Tanto las diferentes posiciones globales de la cuenca como la longitud de esta afecta de forma diferencial y por ende, hace que cualquier metodología aplicada en un contexto diferente puede alterar los resultados esperados.

Debido a que el proceso de urbanización es factible por ley, el hecho de que la gente siga poblando lugares de riesgo elevado se vuelve una problemática legal, donde a pesar de que se pueda aplicar una culturización de emergencia efectiva a la población, esta tiene que ir de la mano con una restricción efectiva en los lugares de riesgo.

Como conclusión se entiende que tanto medidas de mitigación en la zona, como el manejo en la prevención y educación del peligro son factores de gran importancia, asociados con el alto riesgo presente en el sector.

El desarrollo climático y el escenario de desertificación para la cuenca de Santiago también puede afectar el desarrollo natural de las condiciones de estabilidad, es por esta razón que este estudio contempla también la capa vectorial respectiva al modelamiento probabilístico de alcance e intensidad para posibles remociones en masa acuosas que afecten a la hoya incorporando el mapa de alcance de flujos de detritos para los peores escenarios de precipitación, modificado y extraído desde trabajos de modelamiento regional (Celis, 2018).

La primera interpolación implica la ubicación de las trazas antrópicas de mediana y baja escala respecto al posible alcance de remociones en masa y su intensidad dentro del cauce (Figura 7.1), con el objetivo de definir de mejor forma el impacto humano dentro de las zonas de peligro, para así contemplar de mejor manera el riesgo y la vulnerabilidad de la población y la infraestructura dentro de la cuencas.

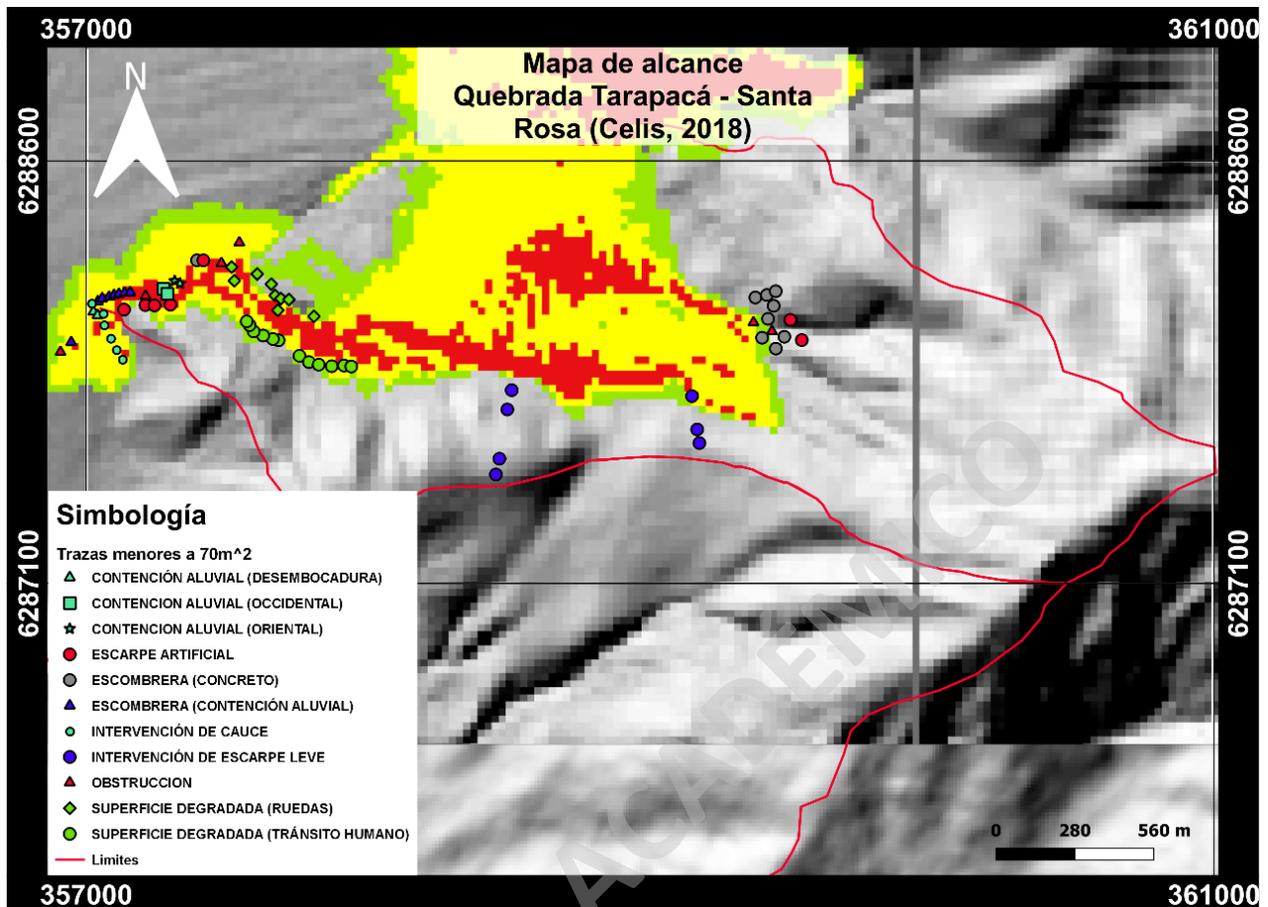


Figura 7.1: Mapa de alcance de flujos e inventario de trazas antrópicas menores para Quebrada Tarapacá – Santa Rosa.

Tal y como se aprecia en el mapa de estimación probabilística, Quebrada Tarapacá – Santa Rosa presenta niveles de peligro geológico alto tanto por las condiciones de estabilidad de laderas como por las probabilidad de alcance e intensidad de flujos de detritos. Las trazas humanas se encuentran dispuestas principalmente en los bordes y en el cauce de las redes esporádicas dentro de la desembocadura de la hoy, colindando con las zonas de intensidad de flujos media y alta.

Respecto a las trazas ubicadas en las porciones de mayor altura de la cuenca hidrográfica, estas no suponen un riesgo de desastre por alcance de flujos de detritos, pero es importante recalcar que el modelamiento de alcances e intensidad de flujos nace desde la caracterización geológica y geotécnica de las unidades geomorfológicas, es decir, se utilizan los datos de probabilidad de desestabilización de laderas para el análisis del aporte detrítico y acuoso del flujo superficial. Incorporando estas evidencias, se puede definir preliminarmente que los niveles de intensidad altos pueden estar dominados por la alta probabilidad de desestabilización de las laderas presentes.

La segunda interpolación relevante implica la ubicación de la Antropósfera de Santiago respecto al alcance e intensidad del modelo de flujos de detritos, específicamente el sector urbano aledaño a la zona de desembocadura de la cuenca Tarapacá – Santa Rosa (Figura 7.2). Esta interpolación sirve como diagnóstico para la revisión del riesgo geológico de desastre potencial para la Quebrada Tarapacá – Santa Rosa.

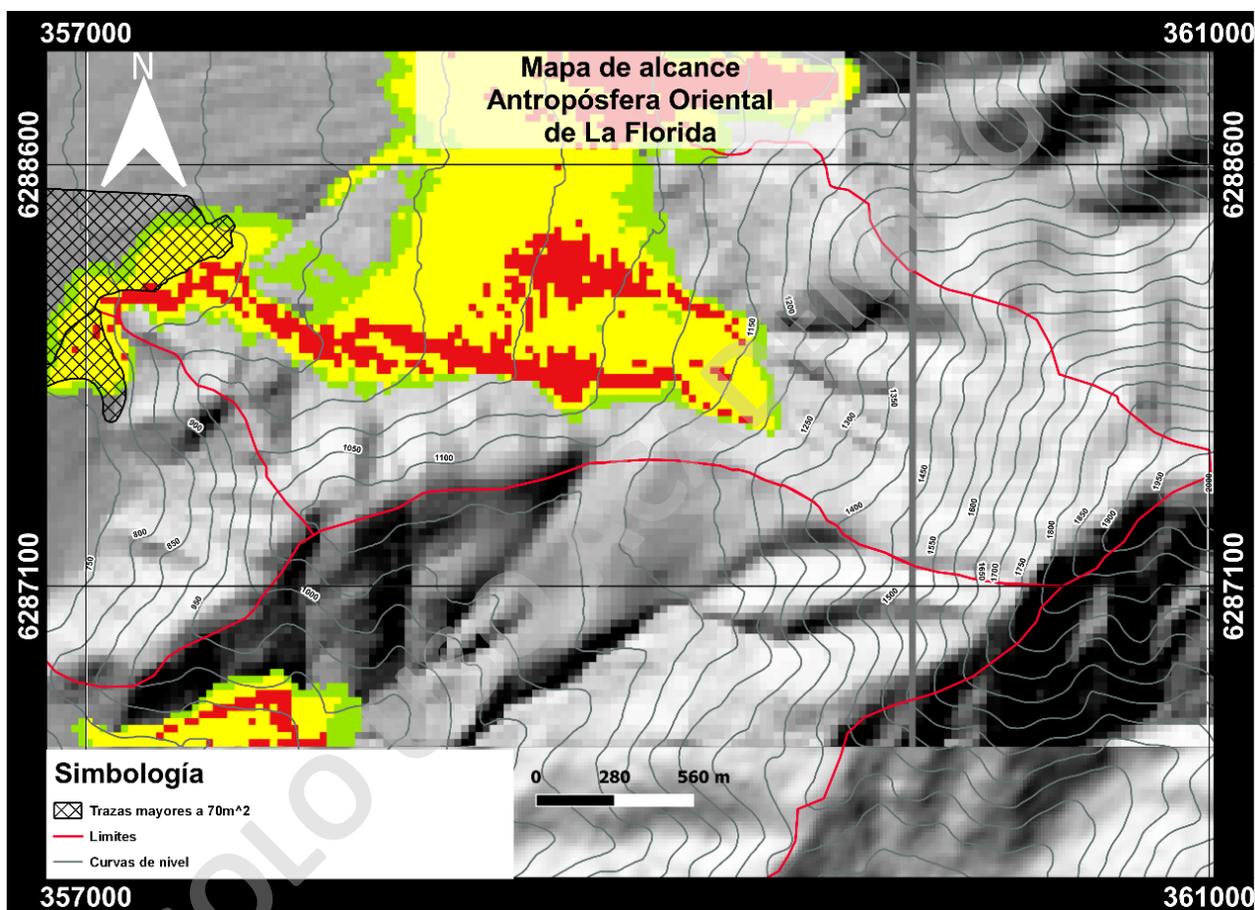


Figura 7.2: Mapa de alcance de flujos e inventario de trazas antrópicas mayores para Quebrada Tarapacá – Santa Rosa.

Analizando los niveles de riesgo asociados al perímetro de la porción suroriental de la Antropósfera de Santiago se puede apreciar que, ante un posible evento de flujos de detritos con las peores condiciones atmosféricas, el alcance de una remoción generada en el área puede llegar hacia las zonas pobladas, marcando recorridos sobre las trazas humanas ubicadas en la desembocadura

Todos los productos y la interpolación de las trazas humanas respecto al índice de susceptibilidad y al alcance de posibles remociones en masa marcan 2 conclusiones fundamentales. La confluencia fluvial y las condiciones de estabilidad entre las laderas presentan una condicionalidad poco

favorable respecto al sustrato, sin embargo, existen dentro del área muchos factores que influyen en la desestabilización artificial de estas, no solamente afectando al factor predominante geomorfológico, si no también modificando los factores de saturación y cohesión del suelo, en conjunto a la alteración del factor geotécnico en las laderas. Las diferencias kilométricas respecto a las cuencas adyacentes generan zonas donde la probabilidad de peligro geológico es poco relevante debido a la extensión de los fenómenos, pero la intervención humana en la primera mitad de la cuenca marca hitos de peligro geológico importante para analizar. Si bien estas cuencas representan sistemas fluviales esporádicos de baja envergadura, existe un peligro geológico latente principalmente tanto por la génesis de flujos superficiales como la desestabilización de ladera y aporte de sustrato dentro de la cuenca hidrográfica. Otra de las interpretaciones relevantes a mencionar responde a los niveles de riesgo y vulnerabilidad asociados a la cuenca, no solamente hablando de las pérdidas materiales de la tecnosfera en la desembocadura, sino también de posibles pérdidas de la infraestructura crítica de concreto o metal atingente a la contención aluvional, redes eléctricas o dispuestas para el tránsito y comodidades de vivienda para la comunidad. Muchas de estas zonas del alcance con intensidad media o alta de posibles eventos de flujos aluvionales en el sector comprenden unidades geomorfológicas inestables y subsaturadas, las cuales pueden ceder ante un posible evento de precipitaciones anómalo. Incorporando este nivel preliminar de peligro, muchas de las zonas presentan además construcciones para la comodidad del tránsito y la generación de caminos en zonas bajas y miradores en zonas altas respectivamente, modificando las condiciones naturales de tensión y cohesión de los depósitos y dando pie a nuevas expansiones de la ciudad sobre el piedemonte. La presencia de este impacto antropogénico actúa como un factor predominante para la delimitación de zonas de alto potencial de riesgo geológico, debido tanto al posible peligro geológico asociado a la desestabilización de laderas, como también a la normalización de la vivienda en zonas precordilleranas y los procesos de expansión inmobiliarias. Los terrenos con pendientes menores a 10° y que no tienen una probabilidad significativa en la génesis de flujos han comenzado a ser suelo en disputa por la compraventa de este recurso por años, sin tomar en cuenta los potenciales niveles de peligro y riesgo geológico investigados en el área ni la evidencia científica, aumentando la posibilidad de potenciales desastres geológicos.

8 Bibliografía

- Aleotti, P. (2004). A warning system for rainfall-induced shallow failures. *Engineering Geology*, 73(3-4), 247–265.
- Anh, V., Trung, P., Nguyen, K., Liou, Y., y Phan, M. (2021). Human impacts on estuarine erosion-deposition in southern central vietnam: Observation and hydrodynamic simulation. *Sustainability*, 13(15), 8303.
- Anthropocene Working Group (2022, February). Report of activities, Volume 11, Page 5. http://quaternary.stratigraphy.org/wp-content/uploads/2022/03/AWG-Newsletter-2021_final.pdf
- Vergara, J. (1985). Análisis de la carta geomorfológica de la cuenca del Mapocho. *Investigaciones Geográficas*, (32), ág-31.
- Armijo, R., Rauld, R., Thiele, R., Vargas, G., Campos, J., Lacassin, R., y Kausel, E. (2010). The West Andean thrust, the San Ramon fault, and the seismic hazard for Santiago, Chile. *Tectonics*, 29(2).
- Barcaza, G., Nussbaumer, S., Tapia, G., Valdés, J., García, J., Videla, Y., Amapola, A., Arias, V. (2017). Glacier inventory and recent glacier variations in the Andes of Chile, South America. *Ann. Glaciol*, 58 Pt 2, 166–180.
- Brabb, E., Pampeyan, E., y Bonilla, M. (1972). Landslide susceptibility in San Mateo County, California (No. 360). US Geological Survey.
- Bono, L. (2014). Modelación de los lahares del volcán Villarrica en el sector de Pucón, Región de la Araucanía. Memoria para optar al Título de Geóloga. Departamento de Geología, Universidad de Chile
- Boretto, G., Crema, S., Marchi, L., Monegato, G., Arziliero, L., yCavalli, M. (2021, April). Assessing the effect of the Vaia storm on sediment source areas and connectivity storm in the Liera catchment (Dolomites). In EGU General Assembly Conference Abstracts (pp. EGU21-7643).
- Bozzo, S., Villablanca, C., y Wolff, M. (2005). La Florida. Una comuna de contrastes. *Revista Chilena de Antropología Visual*, (5), 180-202.
- Caballero, E. (2011). El concepto de ladera urbana. *Revista Ciencias Espaciales*, 4(1), 41-61.

- Coussot, P. y Meunier, M. (1996). Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth-Science Reviews*, 40(3-4), 209-227.
- Ceballos, P. (2016). Evaluación de peligro de remociones en masa en Quebrada de Apoquindo, sector oriente de Santiago, Región Metropolitana. Memoria para optar al Título de Geólogo. Departamento de Geología, Universidad de Chile, 163
- Celis, C. (2018). Susceptibilidad de remociones en masa y peligro de flujos en el frente cordillerano de Santiago, Región Metropolitana. Memoria para optar al Título de Geólogo. Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Chu, Z. (2014). The dramatic changes and anthropogenic causes of erosion and deposition in the lower Yellow (Huanghe) River since 1952. *Geomorphology*, 216, 171-179.
- Comeau, M. (2015). Electrical resistivity structure of the Altiplano-Puna magma body and Volcan Uturuncu from magnetotelluric data.
- Cordero, R., Asencio, V., Feron, S., Damiani, A., Llanillo, P., Sepulveda, E., ... Casassa, G. (2019). Dry-Season Snow Cover Losses in the Andes (18° – 40°S) driven by Changes in Large-Scale Climate Modes. *Scientific Reports*, 1–10.
- Costa, J. y Schuster, R., (1988). The formation and failure of natural dams. *Geological society of America bulletin*, 100(7), 1054–1068.
- Coussot, P., Meunier, M. (1996). Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth Science Reviews*, No.40, p.209-227.
- Cruden, D. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Geologie de l'Ingenieur*, 43(1), 27–29.
- Cruden, D. y Varnes, D. (1996). Landslides: Investigation and mitigation. Landslide types and processes. *Transportation research board special report*, 247, 36–75.
- Crutzen, P. y Stoermer, E. (2000). The “Anthropocene”. *Global Change Newsletter* 41: 17-18.
- Crutzen, P. (2002, November). The “anthropocene”. In *Journal de Physique IV (Proceedings)* (Vol. 12, No. 10, pp. 1-5). EDP sciences.
- Cuanalo, O., Oliva, A. y Gallardo, R. (2011). Inestabilidad de laderas: Influencia de la actividad humana.
- Das, B. y Sivakugan, N. (2016). *Fundamentals of geotechnical engineering*. Cengage Learning.

- Di Castri, F. y Hayek, E. (1976). Bioclimatología de Chile. Universidad Católica. Santiago, 128p.
- Ferrando, F. (2000) Mapa de Riesgo de Remociones en Masa para la Región Metropolitana de Santiago. Proyecto Bases para el Ordenamiento Territorial Ambientalmente Sustentable (OTAS). Inédito, escala 1:250.000.
- Ferrando, F. (2014). Determinación de amenazas y análisis de riesgo del sector precordillerano de la Comuna de La Florida, 195.
- Fock K. y Charrier, R. (2005). Cronología y tectónica de la exhumación en el neógeno de Los Andes de Chile Central entre los 33° y los 34° S. Tesis (geólogo)--Universidad de Chile, 2005.
- Fock, A., Charrier, R., Farías, M., y Muñoz, M. (2006). Fallas de vergencia oeste en la Cordillera Principal de Chile Central: Inversión de la cuenca de Abanico (33-34 S). Revista de la Asociación Geológica Argentina, Publicación Especial, 6, 48-55.
- Fuenzalida, H., Aceituno, P., Falvey, M., Garreaud, R. (2006) Estudio de la Variabilidad Climática en Chile para el Siglo XXI: Resumen Ejecutivo; Universidad de Chile: Santiago, Chile.
- Gajardo Michell, R. (1994). La vegetación natural de Chile. Clasificación y distribución geográfica. Santiago, Chile: Editorial Universitaria.
- García, V. (2000). Fenómenos de remociones en masa asociados a la ocurrencia de anomalías atmosféricas, Santiago Oriente. Memoria para optar al Título de Geólogo. Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Garreaud, R. (2011). Cambio Climático: Bases Físicas e Impactos en Chile. Revista Tierra Adentro, INIA (93).
- Garreaud, R., Alvarez-Garretón, C., Barichivich, J., Boisier, J., Christie, D., Galleguillos, M., Lequesne, C., McPhee, J., Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010-2015 megadrought in central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. Hydrol. Earth Syst. Sci., 21, 6307–6327.
- Garrido, N. (2012). Determinación de peligro de flujos de detritos en la Quebrada Macul, cuenca de Santiago.
- Glade, T., Anderson, M., y Crozier, M. (2005). Landslide Hazard and Risk. John Wiley y Sons Ltd.
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., y Oteo, C. (2002). Ingeniería Geológica. Editorial Pearson Education, Madrid, 744.

Gokceoglu, C., Sonmez, H., Ercanoglu, M. (2000). Discontinuity controlled probabilistic slope failure risk maps of the Altindag (settlement) region in Turkey. *Engineering Geology* No. 55, Elsevier, p. 277-296.

Grieve, I. (2001). Human impacts on soil properties and their implications for the sensitivity of soil systems in Scotland. *Catena*, 42(2-4), 361-374.

Gutiérrez, M. (2008). *Geomorfología*. Pearson/Prentice Hall, Madrid, 898 p., ISBN 97884832-23895.

Haff, P. (2014). Humans and technology in the Anthropocene: Six rules. *The Anthropocene Review*, 1(2), 126-136.

Hauser, A. (1993). Remociones en masa en Chile. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín*, 45, 75.

Hauser, A. (2002). Rock avalanche and resulting debris flow in Estero Parraguirre and Río Colorado, Región Metropolitana, Chile. *Geological Society of America Reviews in Engineering Geology*, 15, 14.

Highland, L., y Bobrowsky, P. (2008). *The Landslide Handbook — A Guide to Understanding Landslides*. U.S Geological Survey Circular, 1325, 129

Hungr, O., Evans, S., Bovis, M., y Hutchinson, J. (2001). a Review of the Classification of Landslide of the Flow Type. *Environmental and Engineering Geoscience*, VII (3), 221–238.

Hungr, O., Leroueil, S., y Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167–194.

Hutchinson, J. (1968). Mass Movements. *Geomorphology. Encyclopedia of Earth Science*, 688–696. 147

Hutchinson, J. (1988). Morphological y geotechnical parameters of landslides in relation to geology y hydrology. General Report. *Landslides, Proc, 5th Int. Symp. on Landslides* (Ed. C. Bonnard), 1.

Instituto de Construcción y Gerencia del Perú, MTC, M. D. (2016). *Manual de Ensayo de Materiales*. Lima, Perú.

Instituto de Investigaciones Geológicas (Santiago, Chile), Thiele, R. y Cubillos, E. (1980). Hoja Santiago: región metropolitana: carta geológica de Chile escala 1: 250.000. Instituto de Investigaciones Geológicas.

IPCC (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Core Writing Team, Pachauri, R., Meyer, L., Eds., IPCC: Geneva, Switzerland, 151p

Jara, P., y Charrier, R. (2014). Nuevos antecedentes estratigráficos y geocronológicos para el Meso-Cenozoico de la Cordillera Principal de Chile entre 32 y 32 30'S: Implicancias estructurales y paleogeográficas. *Andean geology*, 41(1), 174-209.

Jennings, J. (1977). Caves around Canberra. In Australia Speleological Federation. Proceedings of 11th Biennial Conference. The Australian Speleological Federation, Broadway, NSW (pp. 79-95).

Keefer, D. (1984). Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*, vol. 95, p. 406-421.

Klohn, C. (1960). Una zona de inestabilidad estructural con fracturas profundas en los Andes del sur de Chile reactivada en el terremoto del 22 de mayo de 1960. Instituto de Investigaciones Geológicas.

Kong, W. (2002). Risk assessment of slopes. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* No. 35, p. 213-222.

Kump, L., Kasting, J., Crane, R. (2010). *The Earth System*, Prentice Hall, San Francisco.

Lamperein-Polo, P., Vidal-Páez, P. y Pérez-Martínez, W. (2022). Estimación de la subsidencia en torno a la traza de la falla de San Ramón Chile, mediante la técnica SBAS DInSAR usando imágenes TerraSAR-X. *Revista de Teledetección*, (59), 87-102.

Lara, M. (2007). Metodología para la evaluación y zonificación de peligro de remociones en masa con aplicación en Quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana. Tesis para optar al Grado de Magíster en Ciencias Mención Geología. Memoria para optar al Título de Geólogo. Departamento de Geología, Universidad de Chile, 229

Lara, M., Sepúlveda, S., Celis, C., Rebolledo, S., y Ceballos, P. (2018). Landslide susceptibility maps of Santiago city Andean foothills, Chile. *Andean Geology*, 45(3), 433-442.

- Lara, M., y Sepúlveda, S. (2010). Landslide susceptibility and hazard assessment in San Ramón Ravine, Santiago de Chile, from an engineering geological approach. *Environmental earth sciences*, 60(6), 1227-1243.
- Lavee, H., Imeson, A., y Sarah, P. (1998). The impact of climate change on geomorphology and desertification along a Mediterranean-arid transect. *Land degradation ydevelopment*, 9(5), 407-422.
- Leyton, F., Ruiz, S. y Sepúlveda, S. (2010). Reevaluación del peligro sísmico probabilístico en Chile central. *Andean geology*, 37(2), 455-472.
- Lliboutry, L. (1998). Glaciers of the wet Andes. *Glaciers S. Am. Satell. Image Atlas Glaciers World*, 1386, 1148.
- Luebert, F., & Pliscoff, P. (2006). Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. Editorial Universitaria.
- Malmros, J., Mernild, S., Wilson, R., Tagesson, T., y Fensholt, R. (2018). Snow cover and snow albedo changes in the central Andes of Chile and Argentina from daily MODIS observations (2000–2016). *Remote Sensing of Environment*, 209, 240-252.
- Marchi, L., Comiti, F., Crema, S., y Cavalli, M. (2019). Channel control works and sediment connectivity in the European Alps. *Science of the total environment*, 668, 389-399.
- Martínez, B.(2009). Susceptibilidad de remoción en masa en la quebrada de Macul, Región Metropolitana. Memoria para optar al Título de Geóloga. Departamento de Geología, Universidad de Chile, 124.
- Milevski, I. (2011). Factors, forms, assessment and human impact on excess erosion and deposition in the upper Bregalnica watershed (Republic of Macedonia). *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary Issues*, 77-94.
- Moreiras, S., Sepúlveda, S., Correas-González, M., Lauro, C., Vergara, I., Jeanneret, P., ... y Lara, M. (2021). Debris flows occurrence in the semiarid central Andes under climate change scenario. *Geosciences*, 11(2), 43.
- Muñoz, E. (2013). Susceptibilidad de remociones en masa y de respuesta sísmica asociada a fallas mayores en zonas urbanas. Estudio de caso en Viña del Mar, V región. Santiago de Chile.

Muñoz, A. (2018). Metodología para evaluar la amenaza de flujos de detritos utilizando un análisis jerárquico de procesos y el software RAMMS, con aplicación en la cuenca del Estero San Alfonso, Región Metropolitana. Memoria para optar al Título de Geólogo. Departamento de Geología, Universidad de Chile.

Newman, E., Paradis, A., Brabb, E. (1978). Feasibility and cost of using a computer to prepare landslide susceptibility maps of the San Francisco Bay region, California.

Padilla, C. (2006). Análisis de factores meteorológicos desencadenantes de remociones en masa en el sector oriente de Santiago. Memoria para optar al Título de Geólogo. Departamento de Geología, Universidad de Chile, 176.

Pathak, S., Nilsen, B. (2004). Probabilistic rock slope stability analysis for Himalayan condition. Bulletin of Engineering Geology and the Environment No. 63, p. 25-32.

Pérez, A., Ruiz, J., Vargas, G., Rauld, R., Rebolledo, S. y Campos, J. (2014). Improving seismotectonics and seismic hazard assessment along the San Ramon Fault at the eastern border of Santiago city, Chile. Natural Hazards, 71, 243-274.

Pierson, T. y Costa, J. (1987). A rheological classification of subaerial sediment water flows. Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology, vol.7, p. 1-12.

Prieto, C. (1985). Inestabilidades y erosión de laderas asociadas a riadas. Geología y prevención de riesgos por inundaciones, Instituto Geológico y Minero de España, p. 117-192.

Popescu, M. (2002). Landslide causal factors and landslide remedial options. 3rd International Conference on Landslides, Slope Stability and Safety of Infra-Structures, 1–21.

Rauld P., Campos, J. y Thiele, R. (2002). Análisis morfoestructural del frente cordillerano Santiago Oriente entre el río Mapocho y la Quebrada de Macul. Tesis (geólogo)--Universidad de Chile, 2002.

Rauld Plott, R. (2011). Deformación cortical y peligro sísmico asociado a la falla San Ramón en el frente cordillerano de Santiago, Chile Central (33°s).

Rodríguez, C., Bommer, J. y Chandler, R. (1999). Earthquake-induced landslides: 1980-1997. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 18, p.325-346.

- Saavedra, F., Kampf, S., Fassnacht, S., y Sibold, J. (2018). Changes in Andes snow cover from MODIS data, 2000 – 2016. *The Cryosphere*, 12, 1027–1046.
- Sauret, B. (1987). Coulées de débris canalisées. *Compte rendu bibliographique*. In *Risques Naturels*. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, No.150-151, p.65-77.
- Searle, J. y Rovira, J. (2008). Cambio climático y efectos en la biodiversidad: el caso chileno. *Biodiversidad de Chile: patrimonio y desafíos*, 502-503.
- Selby, M. (1993). *Hillslope materials and processes*. Second Edition. Oxford University Press, 451.
- Sepúlveda, S. (1998). Metodología para evaluar el peligro de flujos de detritos en ambientes montañosos: Aplicación en la Quebrada Lo Cañas, Región Metropolitana. Memoria para optar al Título de Geólogo. Departamento de Geología, Universidad de Chile, 96.
- Sepúlveda, S., Murphy, W., Petley, D. (2004). The Role of Topographic Amplification Effects on the Generation of Earthquake-Induced Rock Slope Failures. In: *Landslides, Evaluation and Stabilization*. Lacerda, W., Ehrlich, M., Fontoura, S.A.B. y Sayao, S.F. (eds.), Balkema, vol.1, 311-315.
- Sepúlveda, S., Murphy, W., Jibson, R. y Petley, D. (2005). Seismically induced rock slope failures resulting from topographic amplification of strong ground motions: The case of Pacoima Canyon, California. *Engineering Geology* No.80, p. 336-348.
- Sepúlveda, S., Rebolledo, S., Lara, M., y Padilla, C. (2006). Landslide hazards in Santiago, Chile: An overview. *Iaeg* 2006(105), 1–8.
- Sepúlveda, S., Rebolledo, S., y Vargas, G. (2006). Recent catastrophic debris flows in Chile: Geological hazard, climatic relationships and human response. *Quaternary International*, 158(1), 83–95.
- Sobrino, J. (2012). *La urbanización en el México contemporáneo*. Notas de población.
- Syvitski, J., Waters, C., Day, J., Milliman, J., Summerhayes, C., Steffen, W., Zalasiewicz, J., Cearreta, A., Gałuszka, A., Hajdas, I., Head, M., Leinfelder, R., McNeill, J., Poirier, C., Rose, N., Shotyk, W., Wagnreich, M. y Williams, M. (2020). Extraordinary human energy consumption and resultant geological impacts beginning around 1950 CE initiated the proposed Anthropocene Epoch. *Communications Earth yEnvironment*, 1:32,
- Territorio y Ciudad Consultores. (2013). *Análisis áreas de riesgo precordillera, comunas Peñalolén y La Reina*. Etapa 3: Análisis de resultados de ensayos. SEREMI Metropolitana MINVU, 88.

- Vargas, G., Contardo, J., Tello, S., Cáceres, D., y Yáñez, C. (2018). ¿Urbanización fallada? La Falla San Ramón como nuevo escenario de riesgo sísmico y la sostenibilidad de Santiago, Chile. *Revista de Urbanismo*, (38), 1-20.
- Varnes, D. (1958). Landslide types and processes. *Landslides and engineering practice*, Special Report Washington, DC, Highway Research Board, National Academy of Sciences, 28, 20–47.
- Varnes, D. (1978). Slope Movement Types and Processes. *Transportation Research Board Special Report*(176), 11 – 33.
- Vergara y Drake. (1979). Evidencias de periodicidad en el volcanismo cenozoico de Los Andes Centrales. *Actas Primer Congreso Geológico Chileno*. p. F153-F161.
- Vergara, L., y Verdugo, R. (2015). Condiciones Geológicas-Geotécnicas de la cuenca de Santiago y distribución de daños del terremoto del 27F Resumen. *Obras y Proyectos*, 17, 52–59.
- Villagrán, C. e Hinojosa, L. (2005). Esquema biogeográfico de Chile.
- Whittaker, R. y Likens, G. (1975). The biosphere and man. In *Primary productivity of the biosphere* (pp. 305-328). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Williams, M., Edgeworth, M., Zalasiewicz, J., Waters, C., Steffen, W., Wolfe, A., ... y Summerhayes, C. (2019). Underground metro systems: a durable geological proxy of rapid urban population growth and energy consumption during the Anthropocene. In *The Routledge Companion to Big History* (pp. 434-455). Routledge.
- Wilmshurst, J. (1997). The impact of human settlement on vegetation and soil stability in Hawke's Bay, New Zealand. *New Zealand journal of botany*, 35(1), 97-111.
- Zalasiewicz, J, Williams, M, Smith, A, Barry, TL, Coe, AL, Bown, PR, Brenchley, P, Cantrill, D, Gale, A, Gibbard, P, Gregory, F., Hounslow, M., Kerr, A., Pearson, P., Knox, R., Powell, J. y Waters, C. (2008). ¿Are we living in the Anthropocene? *GSA Today*, 18(2): 4-8.
- Zalasiewicz, J, Waters, C. (2019). The Anthropocene as a Geological Time Unit.
- Zalasiewicz, J., Waters, C., Ellis, E., Head, M., Vidas, D., Steffen, W., Thomas, J., Horn, E., Summerhayes, C., Leinfelder, R., McNeill, J., Gałuszka, A., Williams, M., Barnosky, A., Richter, D., Gibbard, P., Syvitski, J., Jeandel, C., Cearreta, A., Cundy, A., Fairchild, I., Rose, N., Ivar do Sul, J., Shotyk, W., Turner, S., Wagerich, M. y Zinke, J. (2021). The Anthropocene: comparing its meaning in geology (chronostratigraphy) with conceptual approaches arising in other disciplines. *Earth's Future*, 9(3), e2020EF001782