

UNIVERSIDAD DE ATACAMA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA



**CARACTERIZACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN
MASA EN TOTORAL Y PERALES, COMUNA DE COPIAPÓ, REGIÓN DE
ATACAMA, CHILE.**

CAMILA INÉS VARGAS ECHAVARRÍA

Copiapó, Chile 2024

UNIVERSIDAD DE ATACAMA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA



**CARACTERIZACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN
MASA EN TOTORAL Y PERALES, COMUNA DE COPIAPÓ, REGIÓN DE
ATACAMA, CHILE.**

“Trabajo de titulación presentado en conformidad
a los requisitos para obtener el título de GEÓLOGA”

Profesor guía: Nicoll Castillo Jorquera.

CAMILA INÉS VARGAS ECHAVARRÍA

Copiapó, Chile 2024

“Así pasen días, meses o años, lo que es para ti, te encuentra”

AGRADECIMIENTOS

La verdad estoy agradecida de muchas personas, que de una u otra forma sus palabras me ayudaron en algún momento, en especial a mi familia que sin ustedes nada de esto hubiese sido posible, a mi papá por darme ánimos en los momentos más difíciles de la vida universitaria, por ser una fuente de admiración y siempre decirme que después de la tormenta sale el sol, a mis hermanas, gracias por darme la fuerza necesaria para seguir adelante y por todas las risas y a mis sobrinit@s por regalarme rocas y sonrisas. También a mi pareja que llegó para apoyarme en esta última etapa y que siempre estuvo dándome aliento y ayudándome con todo lo que podía.

A la profesora guía Nicoll Castillo, por siempre tener la disposición a responder todas mis consultas y apoyarme en este proceso final de mi enseñanza universitaria y a tod@s l@s docentes por entregarme los conocimientos en esta bonita carrera.

También agradecer a la señora Teresa, sus hijas y Don Manuel, por abrirme las puertas de su casa y darme aliento cuando estaba lejos de mi familia, a cada uno de mis compañer@s de carrera y a los que el día de hoy puedo llamar amigo/a que hicieron que el camino fuera mucho más agradable, escribiendo esto me acuerdo de cada pequeña cosa en la que me ayudaron, espero que puedan triunfar en cada cosa que se propongan. A mis amig@s de la vida que siempre estuvieron apoyándome y deseándome lo mejor en este proceso.

Finalmente, a las personas de la comunidad de Totoral y Perales, su junta de vecinos que siempre tuvieron la disponibilidad de ayudarme en todo lo que podían y dejarme acceder a sus casas para mostrarme un poco de su historia y el impacto de los aluviones.

Me olvidaba de ti, personita que lee esto, por querer tomarte el tiempo de leer este estudio relacionado a remociones en masa, espero que este trabajo sea un aporte para seguir avanzando en esta área.

RESUMEN

Chile enfrenta varias amenazas naturales, como son los fenómenos sísmicos, volcánicos, meteorológicos e hídricos que representan un riesgo para cada una de las regiones. La región de Atacama ha experimentado con frecuencia remociones en masa, que es de las amenazas naturales más recurrentes y han impactado en las diversas ciudades del país desde el siglo XVI. Estos eventos desencadenados principalmente por precipitaciones, han afectado varias localidades, como Totoral y Perales. Según registros, estas zonas han sufrido flujos de detritos en los años 1997, 2015, 2017 y 2022, quedando aisladas y con daños en infraestructura y vialidad. En el presente estudio se realizó una evaluación de la susceptibilidad de remociones en masa específicamente de tipo flujo de detritos y/o barro, procesos de laderas como deslizamiento y desprendimiento o caída de rocas en Totoral y Perales. Se analizaron y describieron los diferentes factores condicionantes tales como la geología y geotecnia, geomorfología, hidrología e hidrogeología, clima, vegetación y actividad antrópica. Este análisis se realizó mediante las primeras tres etapas de la metodología propuesta por Lara (2007), adaptada a las características específicas del área de estudio, junto con una encuesta destinada a identificar el impacto de los aluviones ocurridos en los años 2015, 2017 y 2022. Los resultados de la encuesta permitieron identificar la participación de las comunidades durante los aluviones, los tipos de daños en las viviendas, las fuentes de afectación y el tiempo de aislamiento. Con la información recopilada se elaboró un mapa de índice de susceptibilidad de flujos de detritos y/o barro a escala 1: 20.000, destacando las áreas más susceptibles, mientras que para los deslizamientos y caídas de rocas no se observaron evidencias en el sector. El área de estudio presenta en su mayoría zonas de susceptibilidad media, las cuales corresponden a los depósitos aluviales antiguos y depósitos eólicos. Las áreas con alta susceptibilidad corresponden a la quebrada de Totoral y sus afluentes como la quebrada El Carbón, La Laguna, Del Loro, así como el sector noreste y sur de Totoral y el suroeste de Perales, correspondientes a los depósitos aluviales recientes y a las Gravas de Totoral. A partir de estos resultados, se proponen medidas de mitigación para proteger a la población, considerando que los habitantes de Totoral y Perales han quedado aislados por la destrucción de la carretera producto de flujos de detritos y/o barro.

Palabras claves: Totoral y Perales, susceptibilidad y flujos de detritos y/o barro.

ABSTRACT

Chile faces multiple natural hazards, including seismic, volcanic, meteorological, and hydrological phenomena, posing risks to each region. The Atacama Region has frequently experienced mass movements, one of the most recurrent natural hazards, impacting various cities in the country since the 16th century. These events, primarily triggered by precipitation, have affected localities, such as Totoral and Perales. Records indicate that these areas suffered debris flows in 1997, 2015, 2017, and 2022, resulting in isolation and infrastructure and roadway damage. In this study, an assessment was conducted on the susceptibility to mass movements, specifically debris and/or mud flows, as well as slope processes such as landslides and rockfalls, in Totoral and Perales. Different conditioning factors were analyzed and described, including geology and geotechnics, geomorphology, hydrology and hydrogeology, climate, vegetation, and anthropogenic activity. This analysis was carried out using the first three stages of the methodology proposed by Lara (2007), adapted to the specific characteristics of the study area, and included a survey aimed at identifying the impact of flood events in 2015, 2017, and 2022. The survey results revealed the involvement of communities during debris flow events, the types of housing damage, sources of impact, and periods of isolation. With the gathered information, a 1:20,000-scale debris and/or mud flow susceptibility index map was created, highlighting the most susceptible areas, while no evidence of landslides or rockfalls was observed in the sector. The study area predominantly presents zones of medium susceptibility, corresponding to ancient alluvial and aeolian deposits. The areas with high susceptibility correspond to the Totoral ravine and its tributaries, such as El Carbón, La Laguna, and Del Loro ravines, as well as the northeastern and southern sectors of Totoral and the southwestern area of Perales, associated with recent alluvial deposits and Totoral Gravels. Based on these results, mitigation measures are proposed to protect local populations, emphasizing the isolation caused by road destruction due to debris and mudflows in Totoral and Perales.

Keywords: Totoral y Perales, Susceptibility and Debris and/or mud flows.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Problema de Investigación	1
1.2 Hipótesis	3
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo general.....	3
1.3.2 Objetivos específicos	3
1.4 Área de estudio, ubicación y accesos	4
1.5 Marco geológico local	5
1.5.1 Paleozoico	6
1.5.2 Mesozoico	7
1.5.3 Cenozoico	8
1.6 Geología estructural	11
1.7 Marco geomorfológico regional	12
1.7.1 Planicies fluvio-marinas.....	12
1.7.2 Cordillera de la Costa	13
1.7.3 Pampa transicional	13
1.7.4 Cordillera principal	13
1.8 Antecedentes generales	14
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	15
2.1 Remoción en masa.....	15
2.1.1 Clasificaciones de remociones en masa.....	15
2.1.1.1 Flujos.....	15
2.1.1.2 Desprendimiento o caídas	16
2.1.1.3 Deslizamientos (rotacionales y traslacionales)	16
2.1.1.4 Toppling o volcamientos.....	17
2.1.1.5 Extensiones laterales	17
2.1.2 Factores condicionantes.....	17
2.1.2.1 Geología y geotecnia.....	18
2.1.2.2 Geomorfología	19
2.1.2.3 Hidrología e hidrogeología	19
2.1.2.4 Clima y vegetación.....	20

2.1.2.5 Actividad antrópica	20
2.1.3 Factores desencadenantes	21
2.1.3.1 Precipitaciones	21
2.2.3.2 Sismos	21
2.2 Conceptos claves	22
2.2.1 Susceptibilidad de remociones en masa.....	22
2.1.3 Peligro geológico	22
2.1.4 Riesgo geológico.....	22
2.1.5 Vulnerabilidad	22
2.1.6 Mitigación.....	22
2.3 Evaluación de la susceptibilidad de remociones en masa	23
2.3.1 Flujos de detritos.....	23
2.3.3 Deslizamientos en roca	24
2.3.2 Desprendimientos o caídas de rocas	24
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	25
3.1 Etapa de Gabinete I	25
3.2 Etapa de terreno.....	26
3.3 Etapa de gabinete II.....	28
CAPÍTULO IV: RESULTADOS.....	30
4.1 Análisis de factores condicionantes.....	30
4.1.1 Geología y geotecnia local.....	30
4.1.1.1 Unidad metamórfica.....	30
4.1.1.2 Unidad intrusiva (a)	32
4.1.1.3 Unidad intrusiva (b)	34
4.1.1.4 Unidad de gravas.....	36
4.1.1.5 Depósitos aluviales antiguos.....	38
4.1.1.5 Depósitos aluviales recientes	39
4.1.1.6 Depósitos eólicos	40
4.1.1.7 Geología estructural	41
4.1.2 Geomorfología	43
4.1.3 Hidrología e hidrogeología	45
4.1.4 Clima y vegetación	46

4.1.5 Actividad antrópica.....	48
4.2 Análisis de factores desencadenantes	49
4.2.1 Precipitaciones	49
4.3 Encuesta sobre el impacto de aluviones en Totoral y Perales.....	50
4.4 Eventos de flujos de detritos y/o barro en Totoral y Perales.....	58
4.5 Evaluación del índice de susceptibilidad de remociones en masa	60
4.5.1 Definición de unidades geomorfológicas	60
4.5.2 Cálculo del índice de susceptibilidad.....	61
4.5.4 Mapa de índice susceptibilidad de flujos de detritos y/o barro.....	65
CAPÍTULO V: DISCUSIONES	66
5.1 Metodología.....	66
5.2 Resultados	68
5.3 Recomendaciones	70
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES.....	72
CAPÍTULO VII: REFERENCIAS.....	74
ANEXOS	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Ubicación y accesos al área de estudio. Elaboración propia.	4
Figura 1.2. Área de estudio, donde se observa el Complejo Epimetamórfico de Chañaral (DCce); Tonalita Las Zorras (Ktlz); Diorita Cuarcifera Sierra Colorada (Kdc); Gravas de Ttotal (Mgt); Depósitos aluviales (Qal); Depósitos eólicos (Qe). Extraído y modificado de Blanco <i>et al.</i> , (2003).	5
Figura 1.3. Geomorfología Regional. Modificado de Börgel (1983).	12
Figura 2.1. Esquema de flujo de detritos. Extraído y modificado de USGS (2004).	15
Figura 2.2. Esquema de caída de rocas. Extraído y modificado de USGS (2004).	16
Figura 2.3. Deslizamiento rotacional (A) y traslacional (B). Extraído de USGS (2004).	16
Figura 2.4. Esquema de Toppling o volcamientos. Extraído y modificado de USGS (2004).	17
Figura 2.5. Esquema de extensiones laterales. Extraído y modificado de USGS (2004).	17
Figura 4.1. Afloramiento de rocas competentes de la unidad metamórfica. Fuente: propia.	31
Figura 4.2. Unidad intrusiva (a). Fuente: propia.	32
Figura 4.3. Marcado con color rojo se observa el dique diorítico intruyendo a la Unidad intrusiva (a). Elaboración propia.	33
Figura 4.4. Unidad intrusiva (b). Fuente: propia.	34
Figura 4.5. Unidad intrusiva (b) con intrusión de diques dioríticos (marcados de color rojo). Elaboración propia.	35
Figura 4.6. Fotografía representativa de las gravas grises. Fuente: propia.	36
Figura 4.7. Fotografía representativa de las gravas rojizas. Fuente: propia.	37
Figura 4.8. Fotografía representativa de los depósitos aluviales antiguos. Fuente: propia.	38
Figura 4.9. Fotografía representativa de los depósitos aluviales recientes. Fuente: propia.	39
Figura 4.10. Depósitos eólicos (marcado de color rojo) cubriendo a la unidad intrusiva (b). Fuente: Propia.	40
Figura 4.11. Falla de rumbo con orientación NW-SW (1) y falla de rumbo con orientación NW-SE (2). Elaboración propia.	42
Figura 4.12. Fallas de rumbo menores en la unidad intrusiva (a). Elaboración propia. ...	42
Figura 4.13. Mapa de elevación digital de las pendientes de la zona de estudio. Elaboración propia.	43
Figura 4.14. Mapa de la exposición solar según la orientación de laderas. Elaboración propia.	44

Figura 4.15. Cauces principales y redes de drenajes modificadas del software Global Mapper 18. Elaboración propia.....	45
Figura 4.16. Franjas de los tipos de clima de la región de Atacama: clima desierto costero con nubosidad abundantes (BWn), clima desértico transicional (BWi), clima desierto Frío de montaña (BWk'G) y clima de tundra de alta montaña (EB). Modificado de Köppen (1948).....	46
Figura 4.17. Fotografías de la vegetación presente en el área de estudio. Elaboración propia.	47
Figura 4.18. A) Pavimentación ruta C-416 B) plantaciones de olivos C), D) y E) Construcción de viviendas, las flechas rojas indican las quebradas. Elaboración propia.	48
Figura 4.19. Gráfico de porcentajes de habitantes de Totoral y Perales durante el aluvión de 2015. Elaboración propia.	51
Figura 4.20. Gráfico de barras con las categorías de daño: leve, moderado, mayor y no reparable, Elaboración propia.	51
Figura 4.21. Gráfico de las fuentes de afectación del aluvión de 2015. Elaboración propia.	52
Figura 4.22. Gráfico de los días en que los habitantes quedaron aislados tras el aluvión de 2015. Elaboración propia.	52
Figura 4.23. Gráfico de porcentajes de habitantes de Totoral y Perales durante el aluvión de 2017. Elaboración propia.	53
Figura 4.24. Gráfico de barras con las categorías de daño, leve, moderado, mayor y no reparable, Elaboración propia.	53
Figura 4.25. Gráfico de las fuentes de afectación del aluvión de 2017. Elaboración propia.	54
Figura 4.26. Fotografía de la quebrada Totoral en el aluvión de 2017. La línea roja muestra el límite del agua. Fuente: Modificada de Cristián Vitali.	54
Figura 4.27. Gráfico de los días en que los habitantes quedaron aislados tras el aluvión de 2017. Elaboración propia.	55
Figura 4.28. Gráfico de porcentajes de habitantes de Totoral y Perales durante el aluvión de 2022. Elaboración propia.	55
Figura 4.29. Gráfico de barras con las categorías de daño, leve, moderado, mayor y no reparable, Elaboración propia.	56
Figura 4.30. Gráfico de las fuentes de afectación del aluvión de 2022. Elaboración propia.	56
Figura 4.31. Fotografía de la quebrada Totoral en el aluvión de 2022. Fuente: Sara Vallejo.	57

Figura 4.32. Gráfico de los días en que los habitantes quedaron aislados tras el aluvión de 2022. Elaboración propia.	57
Figura 4.33. Con línea roja se observa el límite del agua en: A) la quebrada Totoral, B) quebrada La Laguna y C) quebrada El Carbón. Elaboración propia.	58
Figura 4.34. Cambio en la geomorfología de la quebrada Totoral posterior al aluvión de 2017. Elaboración propia	59
Figura 4.35. Registro del aluvión de 2022 en la unión de la quebrada Totoral y la Laguna. Elaboración propia.	59
Figura 4.36. Mapa de unidades geomorfológicas. Elaboración propia.	60
Figura 4.37. Mapa de Índice de Susceptibilidad de flujos de detritos y/o barro. Elaboración propia.	65
Figura 5.1. Señales por remociones en masa del tipo aluvión. Extraída de SENAPRED (2024).	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Factores condicionantes para los distintos tipos de remociones en masa (Hauser, 1993)	18
Tabla 2.2. Ponderación máxima de factores condicionantes de flujos de detritos. Extraído de Lara (2007).	23
Tabla 2.3. Ponderación máxima de factores condicionantes de deslizamientos en roca (Lara, 2007).....	24
Tabla 2.4. Ponderación máxima de factores condicionantes de caídas de rocas (Lara, 2007).	24
Tabla 4.1. Precipitaciones anuales máximas en 24 hrs (mm). Estación Totoral, DGA. Elaboración propia	49
Tabla 4.2. Valores de las pendientes de cada polígono. Elaboración propia.	61
Tabla 4.3. Ponderación del factor geología-geotecnia. Elaboración propia	62
Tabla 4.4. Ponderación de factores condicionantes y el índice de susceptibilidad (IS) de flujos de detritos asociado a cada polígono. Elaboración propia.	63

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Problema de Investigación

Las remociones en masa son procesos geológicos en los cuales se desplaza material por la acción de la gravedad y pueden ser peligrosos o catastróficos (Cruden y Varnes, 1996). Varios autores como Varnes (1958,1978), Hauster (1993), Cruden y Varnes (1996), Naranjo y Varela (1996), Hungr *et al.* (2014), entre otros, han clasificado los distintos eventos de remoción en masa, estos consideran factores como los tipos de materiales involucrados, el mecanismo de ruptura, el grado de saturación, junto con las características geológicas, geotécnicas y geomorfológicas. La clasificación más aceptada es la propuesta por Varnes (1958, 1978), el cual menciona que los principales tipos de remoción en masa son los siguientes:

- Flujos
- Desprendimiento o caídas
- Deslizamientos (rotacionales y traslacionales)
- *Toppling* o volcamientos
- Extensiones laterales

Chile tiene registros de remociones en masa desde el siglo XVI hasta la actualidad, desencadenadas en su mayoría por precipitaciones y sismos. Entre los casos más relevantes de flujos de detritos se encuentra Alfalfal (1987), este evento fue gatillado por un derrumbe en el estero Parraguirre, que provocó la destrucción total de la localidad de Alfalfal y 29 víctimas fatales (Hauser, 2002). En Antofagasta (1991) intensas precipitaciones de entre 17 y 42 mm causaron la destrucción de 700 viviendas, dejando 91 fallecidos y 19 desaparecidos (SERNAGEOMIN, 2017). En 1993, lluvias intensas en la Quebrada de Macul provocaron flujos de detritos que generaron olas de hasta un metro de alto, causando la muerte de 26 personas (Hauser, 2002; Padilla, 2016). La región de Atacama, ha tenido un importante registro de remociones en masa del tipo flujo, desencadenadas por precipitaciones de intensidad mayor a lo habitual (Fernández, 2022). Destaca el evento meteorológico en marzo de 2015, en el que precipitaron entre 10 mm en la costa y más de 85 mm en cordillera. En este evento, las lluvias causaron inundaciones

en varias ciudades de la región; los mayores daños fueron en las ciudades de Chañaral y Copiapó, teniendo por consecuencias 31 muertos, 16 desaparecidos y 35.000 damnificados, además de la destrucción de 2000 casas y más de 1500 sufrieron daños de diversa consideración (Izquierdo *et al*, 2018). En el área de estudio, se localizan las comunidades agrícola-ganaderas de Totoral y Perales, que se ubican en la quebrada Totoral. Según Blanco *et al.* (2003) está que tiene registros de flujos de detritos ya que parte importante de los materiales detríticos que componen la Formación Gravas de Totoral, tuvieron su origen en fenómenos de flujo de detritos en tiempo de la “paleo quebrada Totoral”. Se tienen registros de flujos de detritos (aluviones) en Totoral en los años 1997, 2015 y 2017. El aluvión de 1997, provocado por la crecida de las principales quebradas afluentes de la quebrada Totoral, dejó aislada a la localidad de Totoral y destruyó gran parte del camino que conduce a la caleta Totoral Bajo (Sociedad Contractual Minera El Morro, 2008). Para el aluvión del 2015, el barro cubrió varios predios de los agricultores de Totoral afectando su producción (INDAP, 2016). Según el diario Vallenar digital¹ el aluvión del 13 de mayo de 2017, provocó destrozos en los huertos, destrucción de los árboles y daños en la producción de aceitunas. El portal electrónico de radio Nostálgica² reportó el 11 de julio de 2022 que la ONEMI registró precipitaciones superiores a 46 mm; debido a esto, se produjo la activación de, al menos, tres quebradas, afectando algunas viviendas del sector. Las comunidades de Totoral y Perales han tenido varios registros de flujos de detritos, quedando aisladas y sufriendo la destrucción de infraestructuras y vialidad, además en la vertiente sur poniente de la quebrada Totoral. Se han registrado caídas de rocas desde laderas rocosa muy fracturadas, con bloques inestables (Sociedad Contractual Minera El Morro, 2008), sin embargo, con todos estos antecedentes no existen trabajos previos relacionados a esta temática en la zona de estudio.

¹ Vallenar Digital (2017, septiembre 20) Sence implementa en Totoral curso especial para vecinos afectados con los aluviones de mayo. Vallenar Digital. <https://portalweb.vallenardigital.cl/categoria/atacama/sence-implementa-en-totoral-curso-especial-para-vecinos-afectados-con-los-aluviones-de-mayo/> (fecha de consulta: 21 julio de 2023)

² Nostálgica.cl (2022, julio 11) Activación de quebradas deja varias viviendas dañadas en Totoral. Nostálgica.cl. <https://www.nostalgica.cl/activacion-de-quebradas-deja-varias-viviendas-danadas-en-totoral/> (fecha de consulta: 7 julio de 2023)

Con motivo de lo anterior, es que es conveniente evaluar la susceptibilidad de remociones en masa, para así determinar las posibles zonas de riesgo y mitigar los posibles daños para los habitantes de las comunidades.

1.2 Hipótesis

El área de estudio posee una alta susceptibilidad a las remociones en masa (flujo de detritos y/o barro, deslizamiento y caída de rocas), esto debido a diversos factores condicionantes, que provocan una acumulación de material sin cohesión, que se depositan en las quebradas y al producirse precipitaciones se desencadenan, activando los procesos de remoción y provocando así un riesgo potencial para las comunidades de Totoral y Perales.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Evaluar la susceptibilidad de remociones en masa de tipo flujo de detritos y/o barro, procesos de laderas como deslizamiento y desprendimiento o caída de rocas, en Totoral y Perales, región de Atacama.

1.3.2 Objetivos específicos

- Describir los diferentes factores condicionantes de las remociones en masa.
- Determinar los diferentes niveles de susceptibilidad para flujos de detritos y/o barro.
- Recomendar medidas de mitigación y prevención del peligro para los distintos niveles de susceptibilidad de remociones en masa.

1.4 Área de estudio, ubicación y accesos

El área de estudio se encuentra en el sector costero entre Copiapó y Vallenar, en donde se sitúan las comunidades de Totoral y Perales, pertenecientes a la comuna de Copiapó, Provincia de Copiapó, III región de Atacama, entre las coordenadas UTM 305.538 – 316.426 y 6.916.865 – 6.909.854 abarcando un área de 43.7 km² aproximadamente.

Para acceder al área de estudio por vía terrestre hay tres rutas, la primera es por el sector noreste, a través de la carretera Panamericana Norte (Ruta 5) y luego la carretera C-416 (color azul), la segunda ruta por el noroeste, es por la carretera C-322 y luego la carretera C-416, y la tercera es por la carretera C-438 (color amarillo) y luego por la carretera C-416 (figura 1.1).

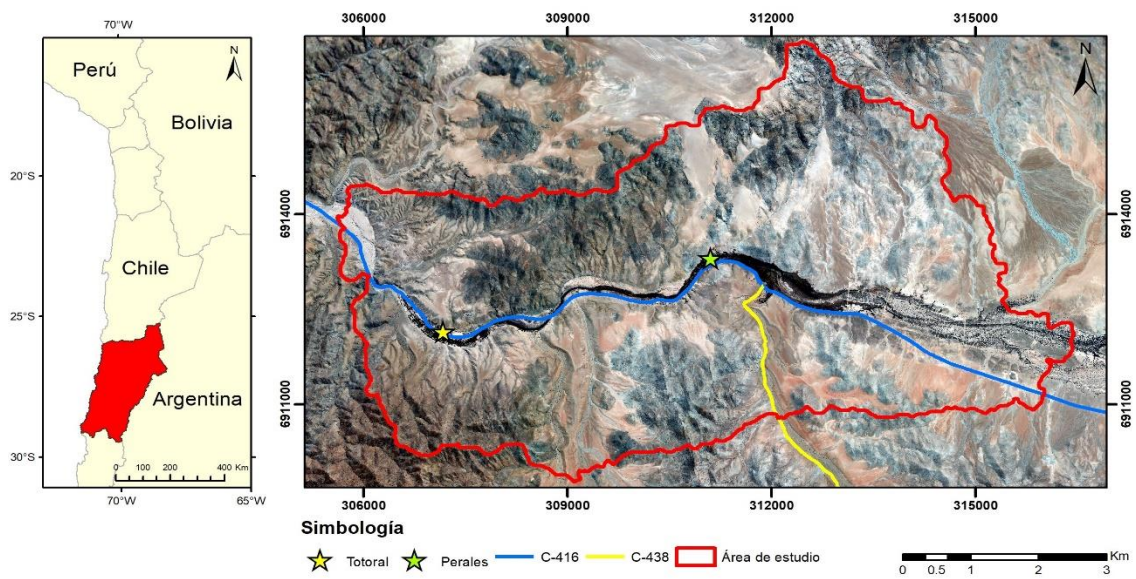


Figura 1.1. Ubicación y accesos al área de estudio. Elaboración propia.

1.5 Marco geológico local

El marco geológico se restringe a la Hoja de Castilla y Totoral Bajo, región de Atacama, levantada por Blanco *et al.* (2003). En ella, se han descrito rocas estratificadas que comprenden edades del Devónico-Carbonífero (Godoy y Lara, 1998), rocas intrusivas plutónicas de edad Cretácico Inferior, y gravas de rango Oligoceno-Mioceno Inferior restringidas al área de la quebrada Totoral, además de sedimentos aluviales y depósitos eólicos del cuaternario (figura 1.2).

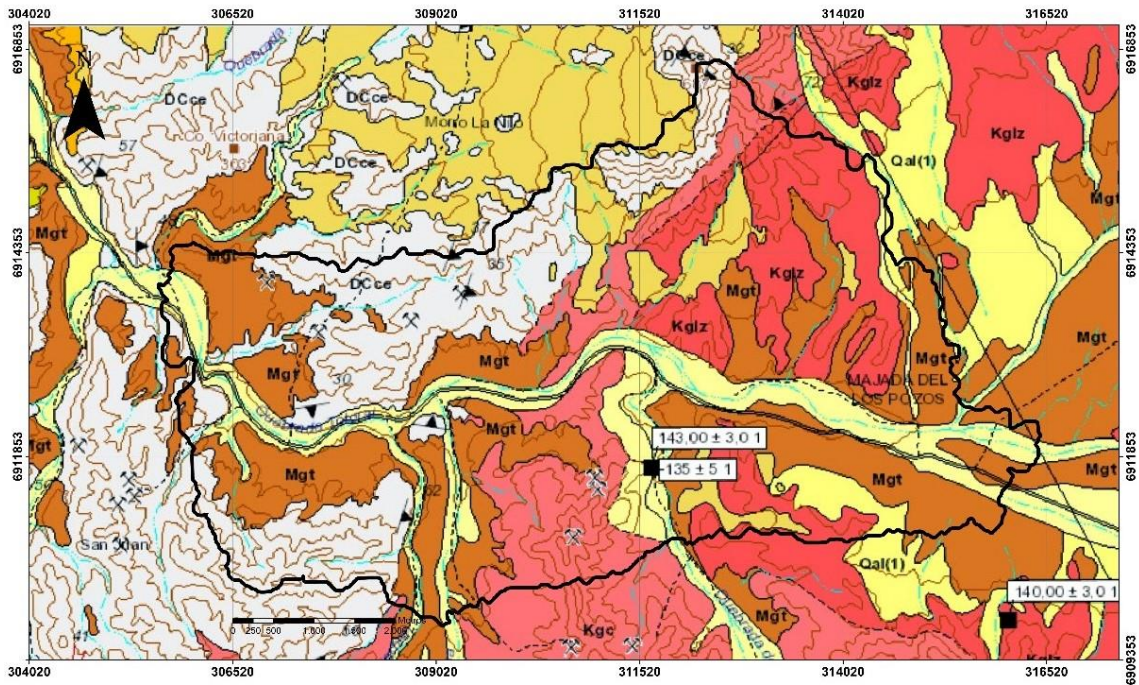


Figura 1.2. Área de estudio, donde se observa el Complejo Epimetamórfico de Chañaral (DCce); Tonalita Las Zorras (Ktlz); Diorita Cuarcifera Sierra Colorada (Kdc); Gravas de Totoral (Mgt); Depósitos aluviales (Qal); Depósitos eólicos (Qe). Extraído y modificado de Blanco *et al.*, (2003).

La deformación de las rocas del Paleozoico puede estar separadas por dos dominios estructurales mayores, uno occidental caracterizado por pliegues apretados de dirección NNE-SSW, y otro oriental cuyos pliegues presentan ejes orientados NW-SE (Bell, 1984; 1987). En relación al ascenso de magmas durante el Jurásico Superior - Cretácico Inferior, el Sistema de Fallas de Atacama habría jugado un rol fundamental (Grocott *et al.*, 1994; Grocott y Wilson, 1996; Godoy y Blanco, 2000).

A continuación, se describen las unidades del área de estudio

1.5.1 Paleozoico

Complejo Epimetamórfico de Chañaral (Devónico-Carbonífero) [DCce]

Denominación, distribución y relaciones de contacto

Conjunto de rocas estratificadas de origen sedimentario clástico, con metamorfismo regional de bajo grado e intensa deformación, compuesta por rocas metasedimentarias-metaareniscas y filitas, con intercalaciones de metacalizas, metacherts y metabasaltos almohadillados. Aflora en una franja elongada hacia el noreste (Godoy y Lara, 1998). Se encuentra cubierto, discordantemente, por las Gravas de Totoral (Mgt) del Mioceno y está intruido por la Diorita Los Cachos (TrJdlc) del Triásico-Jurásico, en su borde occidental, y granitoides del Cretácico Inferior (Kdc), en el margen oriental. Su base no está expuesta (Godoy y Lara, 1998)

Litología, potencia y ambiente deposicional

Su litología consiste en metaareniscas, cuarcitas, pizarras, filitas y cuerpos lenticulares de mármol y metabasitas. Tienen espesores individuales de 5-40 cm hasta 4 m (Godoy y Lara, 1998).

El grado de metamorfismo de las rocas del Complejo Epimetamórfico de Chañaral, excepto en los sectores que presenta cornificación, corresponde a facies de esquistos verdes, representado por la asociación cuarzo, albita, clorita, muscovita y calcita (Oliveras, 1975). Tanto las asociaciones litológicas en conjunto con las estructurales, han llevado a algunos autores a postular que este complejo epimetamórfico se habría formado en un prisma de acreción (Bell, 1984; 1987).

Edad y correlación

Las relaciones de contacto sólo permiten asignarle una edad pre-Triásico Superior, sin embargo, Miller (1970) identificó la presencia de *Lophoctenium comosum* de edad Devónica-Carbonífera, ya que estas rocas se encuentran en continuidad de afloramiento con el complejo Epimetamórfico de Chañaral. Por otra parte, Bahlburg *et al.* (1996) reportaron la presencia de conodontes *Gnathodus sp* el cual es atribuido al Carbonífero. Esta información fue complementada por Bell (1987), quién reportó la presencia de spiriféridos y briozoos en las calizas en la mélangé, de edad Carbonífera-Pérmica.

1.5.2 Mesozoico

Tonalita Las Zorras (Cretácico Inferior) [Ktlz]

Denominación, distribución y relaciones de contacto

Es un cuerpo tonalítico, de color gris claro, como núcleo respecto a la Diorita Cuarcifera Sierra Colorada, con orientación noreste-suroeste y se acuña hacia el noreste (Sector quebrada La Justa) (Blanco *et al.*, 2003).

Los márgenes de este cuerpo lo constituyen una envolvente de rocas miloníticas, que lo ponen en contacto al noroeste y sur con la Diorita Cuarcifera Sierra Colorada (Blanco *et al.*, 2003).

Litología

Consiste en tonalitas de hornblenda y/o biotita, inequigranulares, en general con hornblenda parcialmente cloritizada y/o reemplazada por epidota y biotita. Variaciones composicionales incluyen granodioritas de hornblenda y dioritas cuarcíferas de hornblenda (Blanco *et al.*, 2003).

Edad y correlación

Para este cuerpo, se disponen de varias edades en K-Ar en minerales máficos 140±3 Ma (biotita, cerro La Noria), 137±3 Ma (biotita, nacientes quebradas del Central), 144±3 Ma (biotita, cerro Las Vacas), 133±3 Ma (biotita, oeste de sierra Hornillos), y en la quebrada El Loro, 143±3 Ma (biotita) y 135±5 Ma (hornblenda), por lo que todas ellas dan cuenta de una edad cretácica inferior (Blanco *et al.*, 2003).

Diorita Cuarcifera Sierra Colorada (Cretácico Inferior) [Kdc]

Denominación, distribución y relaciones de contacto

Extenso cuerpo diorítico cuarcífero de color gris verdoso claro, se observa como un semiarco abierto hacia el este, como una envolvente externa en torno a la Tonalita Las Zorras, elongado en dirección noreste-suroeste (Blanco *et al.*, 2003).

Al oeste intruye al Complejo Epimetamórfico de Chañaral (DCce) y al oriente está limitado por su borde milonítico que lo pone en contacto con la Tonalita Las Zorras (Ktlz). Al norte está cubierto por depósitos aluviales y eólicos cuaternarios (Blanco *et al.*, 2003).

Litología

Corresponden en su mayoría a dioritas cuarcífera de hornblenda y biotita, alterados parcialmente a clorita y actinolita. Localmente el cuerpo presenta variaciones de granodioríticas y tonalíticas (Blanco *et al.*, 2003).

Edad y correlación

En sierra Montosa, se obtuvo dos edades de K-Ar en biotita 139 ± 3 Ma y 141 ± 3 Ma, mientras que al sur de mina Costa Rica se obtuvo una edad de 143 ± 4 Ma, que corresponden al Cretácico Inferior, interpretadas como edades de intrusión (Blanco *et al.*, 2003).

1.5.3 Cenozoico

Gravas de Totoral (Mioceno Inferior) [Mgt]

Denominación, distribución y relaciones de contacto

Depósitos de bloques, gravas, arenas y limos, pobremente consolidados, están ubicados en la quebrada Totoral, expuestas en el sector centro y suroeste. Se depositan sobre granitoides del Cretácico Inferior (Blanco *et al.*, 2003).

Litología, potencia y ambiente deposicional

En la quebrada Totoral, consisten principalmente de dos tipos de gravas interestratificadas: una de color gris claro y otra pardo-rojiza. Las gravas grises son clasto soportadas, dispuestas en capas de morfología canalizada, con clastos subredondeados e imbricados, de moderada a mala selección, compuestos predominantemente por andesitas (70%) y granitoides (30%), alcanzan un espesor de 100 metros en la quebrada La Cachina. Estos depósitos representan un ambiente fluvial, de tipo trenzado (Blanco *et al.*, 2003).

Edad y correlación

La edad de la Gravas de Totoral tiene un rango de edad Oligoceno- Mioceno Inferior. La presencia del género *Criborotalia* permite asignarle una edad Oligoceno-actualidad. No obstante, considerando las relaciones de contacto de las Gravas de Totoral, que subyace a la Formación Bahía Inglesa, Haq *et al.*, (1987) les asignan una edad a los estratos de rango Oligoceno – Mioceno Inferior, pues plantean que la sedimentación agradacional de las gravas se debería a un ascenso global del nivel del mar al inicio del

Mioceno inferior y que ésta habría ocurrido posterior a una incisión de carácter regional debido al descenso del nivel del mar en el límite Oligoceno Inferior-Superior.

Los afloramientos ubicados al este y sur de la localidad de Totoral pudiesen ser equivalente a la Formación Bahía Inglesa, por lo que la edad del techo de los depósitos correspondería al Plioceno Inferior (Blanco *et al.*, 2003).

Depósitos aluviales (Cuaternario) [Qal]

Denominación, distribución y relaciones de contacto

Sedimentos no cohesivos a moderadamente consolidados, constituidos por bloques, ripios, gravas, arenas y limos. Por sus relaciones morfológicas y de contacto se dividen en: (1) Inactivos, distribuidos en el área de la Depresión Central y llanos intermontanos de la Cordillera de la Costa y (2) activos, ocurren en cauces someros de actividad esporádica, en el fondo de grandes quebradas y como abanicos aluviales situados en el borde costero. Se encuentran cubiertos o engranando con los depósitos eólicos activos (Blanco *et al.*, 2003).

Litología, potencia y ambiente deposicional

Según Blanco *et al.*, (2003) por sus relaciones morfológicas y de contacto se dividen en:

(1) Inactivos: están formados por bloques, ripios, gravas y arenas mal redondeadas y seleccionadas, contenidos en una matriz de arena y arcilla. Tienen espesores decimétricos y constituyen extensas llanuras aluviales.

(2) Activos: De acuerdo a su granulometría, se dividen en: (a) gravas: Depósitos polimícticos de bloques y gravas, mal redondeadas y seleccionadas, en una matriz arenarcillosa. Presentan espesores decimétricos. (b) limos: de color pardo rojizo, presentan bancos decimétricos bien estratificados, que alcanzan espesores de hasta 2 metros. Representan facies distales de flujos aluviales, de actividad actual y esporádica.

Edad

Por encontrarse activos, se les asigna una edad holocena (Blanco *et al.*, 2003).

Depósitos eólicos (Cuaternario) (Qe)

Denominación, distribución y relaciones de contacto

Arenas y areniscas bien seleccionadas, de grano fino a grueso. Por sus características morfológicas se distinguen: Inactivos no litificados (1a), que se localizan en los llanos Los Medanitos y Los Burros, al norte del poblado Totoral y en quebrada Seca; inactivos litificados (1b), expuestos en el Llano de Agua de los Burros y quebrada Mal paso y activos (2 a) dunas lineares, o 'seif', en el borde litoral y valles transversales, (2b) mantos de arenas, en llanos intermontanos y (2c) dunas parabólicas, en la Depresión Central. Cubre al Complejo Epimetamórfico de Chañaral y Tonalita Las Zorras (Blanco *et al*, 2003).

Litología y potencia

Blanco *et al.*, (2003), por sus relaciones morfológicas y de contacto los dividen en: (1a) Inactivos no litificados, mantos de arenas bioclásticas de grano medio a grueso de compactación leve, bien seleccionada, que incluyen fragmentos de cuarzo, plagioclasa, líticos metamórficos, magnetita, epidota y hematita, suavemente inclinados al oeste. (1b) Inactivos litificados, areniscas bioclásticas blancas, de grano medio a grueso. Contienen 90% de bioclastos y 10 % de fragmentos monominerales. Presentan potencias que varían entre 50 y 100 metros. (2) Activos, arenas de grano fino a grueso, no cohesivas, depositadas como (2a) dunas lineares, de grano medio a grueso, cuarcíferas (70-80%), con cantidades menores de epidota y magnetita, alcanzan dimensiones de 0,1-0,8 km de ancho por 1,2-10 km de longitud (2b) mantos de arenas, son de grano medio a grueso, predominan los fragmentos calcáreos, cuarzo, epidota y líticos y (2c) dunas parabólicas, son de grano medio a fino, contienen cuarzo, bioclastos y en menor cantidad epidota y líticos. Forman franjas elongadas de 0,5-2 km de ancho por 10-12,5 km de largo.

Edad y correlación

Q (1a) Se encontraron gastrópodos terrestre del tipo *Bostryx* (Lissoacme) cf. *Erythrostomus*, de edad cuaternaria Q (1b). Ocasionalmente, contienen microfósiles de gastrópodos pulmonados tipo *Bostryx* (Lissoacme) cf. *Affinis* y *Bostryx* (Lissoacme) cf. *Pruinosus*, de edad cuaternaria. A los depósitos activos (2a, 2b, 2c) se les asigna una edad holocena (Blanco *et al.*, 2003).

1.6 Geología estructural

A escala regional, la deformación que afecta a las rocas del Paleozoico Superior se puede dividir en dos dominios estructurales principales; uno occidental, caracterizado por pliegues apretados, en parte isoclinales, con ejes doblemente buzantes de dirección NNE-SSW, y otro oriental, cuyos pliegues presentan ejes orientados noroeste - sureste y buzante al sureste (Bell, 1984, 1987). Los cuerpos plutónicos del Jurásico Superior-Cretácico Inferior, presentan una característica orientación noreste-suroeste paralela al SFA (Ugalde y Capó, 1996). En el caso de la Tonalita Las Zorras (Kglz), el emplazamiento, probablemente, se asocia a la actividad igualmente sinistral de una estructura precursora del SFA (Blanco *et al.*, 2003).

En el segmento sur cerca del área de estudio se encuentra el Sistema de Fallas de Atacama (SFA) de norte a sur, ha sido subdividido en tres segmentos principales de fallas frágiles y dúctiles: Salar del Carmen, Segmentos Paposo y El Salado (Naranjo, 1987; Brown *et al.*, 1993), con una orientación noreste-sureste, este es el rasgo estructural más relevante del antearco externo del norte de Chile, descrito como una extensa red de fallas asociadas, que se orientan paralelas al margen, con una extensión de 1100 km (Carrizo y González, 2003). Este Sistema representa el eje del arco magmático que facilitó el emplazamiento de los complejos plutónicos y secuencias volcánicas durante el Jurásico Superior-Cretácico Inferior (García, 1967; Grocott *et al.*, 1994; Grocott y Wilson, 1996; Godoy y Blanco, 2000).

1.7 Marco geomorfológico regional

En el margen sur de la región de Atacama, los rasgos geomorfológicos que se reconocen de oeste a este según Börgel (1983) son cuatro: Planicies fluvioamarinas, Cordillera de la Costa, Pampa transicional y Cordillera Principal (o de los Andes) (figura 1.3).

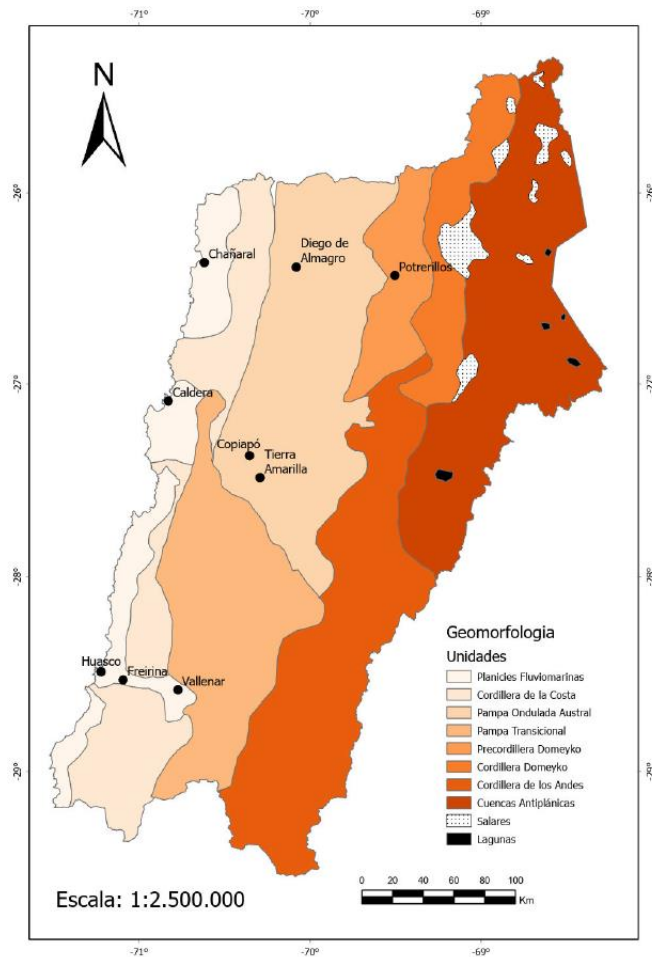


Figura 1.3. Geomorfología Regional. Modificado de Börgel (1983).

1.7.1 Planicies fluvioamarinas

Estas planicies se definen como una estrecha plataforma con suave pendiente al oeste y de baja altura, compuesta por depósitos marinos y fluviales, dominados por terrazas marinas (Paskoff, 1970; Ota *et al.*, 1995; Marquardt *et al.*, 2004 y Le Roux *et al.*, 2005), sistemas aluviales, piedemontes y playas arenosas, que son interrumpidas por los acantilados del farellón costero hasta aproximadamente la latitud de Taltal, para seguir en forma ininterrumpida hasta el límite sur (Errázuriz *et al.*, 1998).

1.7.2 Cordillera de la Costa

Es una cadena montañosa de orientación norte-sur, está constituida por elevaciones, cerros islas y serranías, con unos 60 km de ancho y altitud máxima alrededor de 2000 m.s.n.m (Riquelme *et al.*, 2003; Fernández y Espinoza, 2020); su principal característica tectónica es el sistema de fallas de Atacama (AFS), más al sur no es posible diferenciar la Cordillera de la Costa de la Precordillera (Charrier *et al.*, 2007), donde los procesos de incisión son más intensos, indicando la presencia de un relieve más joven y asociado a procesos fluviales más activos (Montenegro, 2016). Limita al oeste con las planicies fluvio-marinas y al este con la pampa transicional (Aguilar *et al.*, 2013).

1.7.3 Pampa transicional

Corresponden a porciones de la depresión intermedia interrumpida por los valles transversales que encierran valles fluviales como Copiapó y Huasco (Charrier *et al.*, 2007); alcanza una altitud entre los 900 y 2200 m.s.n.m (Latorre *et al.*, 2005). Esta zona está caracterizada por el endorreísmo de sus esporádicos cursos de agua y por estar cruzada por lomajes y sierras. Su formación se debe principalmente a los procesos erosivos (Fernández y Espinoza, 2020).

1.7.4 Cordillera principal

Es una formación montañosa, con alturas máximas que alcanzan los 5800 metros sobre el nivel del mar. Entre los 27°S-32°S los factores tectónicos que pudieron haber contribuido al alzamiento y configuración del paisaje, incluyen el aumento de la convergencia de placas a partir del Oligoceno (Pilger *et al.*, 1984; Wortel, 1984; Pardo-Casas y Molnar, 1987; Somoza, 1998; Kendrick *et al.*, 2003) y la migración de norte a sur de la subducción de la Dorsal de Juan Fernández, ocurrida entre los 16 y 12 Ma (Yáñez *et al.*, 2001), además de factores climáticos que también tendrían un impacto en la configuración del relieve (Aguilar *et al.*, 2013). Entre los 26 y 27°S se diferencian tres superficies que marcarían sucesivos episodios de formación de pedimentos, estas son la Sierra Checos del Cobre, de probable edad oligocena, la superficie Asientos (>17,5 Ma) y el Pediplano de Atacama separados por períodos de incisión, en respuesta al alzamiento de la Cordillera Principal (15-10 Ma) (Bissig y Riquelme, 2009; 2010).

1.8 Antecedentes generales

Blanco, N *et al.* (2003). Realizaron un levantamiento geológico a escala 1:100.000 de las Cartas Castilla y Totoral, entre los paralelos 27°30'- 28°00' S y 70°30' W, trabajo que incluye al área de estudio.

Jorquera, R *et al.* (2003). Este estudio fue realizado por SERNAGEOMIN y tenía por objetivo comprender la evolución metalogénica en la Hoja Totoral Bajo y Castilla en la región de Atacama, analizando los datos mineralógicos y radiométricos, la posible relación genética entre los diferentes tipos de yacimientos y los plutones que los hospedan.

Álvarez, S. (2018). Evaluó la disponibilidad de los recursos hídricos subterráneos en los sectores acuíferos de la quebrada Totoral, para así otorgar derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas. Para esto, se subdividió la cuenca en dos sectores hidrogeológicos (Totoral Bajo y Totoral Alto).

Sociedad contractual minera el morro (2008). Determinó el área de influencia del proyecto minero El Morro, (III región de Atacama), considerando el clima y meteorología, geología, geomorfología y riesgos naturales, suelos, recursos hídricos, medio marino, ruidos y vibraciones, calidad del aire, flora y vegetación terrestre, fauna terrestre, fauna íctica y limnología, medio humano, medio construido, usos del medio, patrimonio cultural y paisaje.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Remoción en masa

La primera definición de remoción en masa fue establecida por Cruden y Varnes (1996) y la más reciente es de Hungr *et al.* (2014), definiendo ésta como un proceso de movilización rápida o lenta de un determinado volumen de suelo, roca o un conjunto de esto. Respondiendo a procesos gravitacionales donde un volumen específico se moviliza desde cotas superiores a niveles menores. Son producto de la combinación de diversos factores geológicos, morfológicos, físicos y antrópicos (Cruden, 1991).

2.1.1 Clasificaciones de remociones en masa

2.1.1.1 Flujos

Corresponden a movimientos continuos de masa, donde las superficies de ruptura no son preservadas, y las masas desplazadas son fuertemente deformadas internamente (Varnes, 1978). Los flujos son clasificados de acuerdo al tipo de material involucrado y a la cantidad de agua que presentan, estos se originan donde existe una cantidad de material detrítico suficiente que pueda ser movilizado mediante la adición de agua. La movilización de esta masa de suelo requiere inicialmente de la pérdida de la resistencia del material y aumento de los esfuerzos de corte actuantes sobre ésta, mientras que la condición de flujo está dada por la reducción de la viscosidad (Varnes, 1978; Hauser, 1993; Naranjo y Varela, 1996). Hauser (2000) define una subcategoría en la cual, si el flujo presenta cantidades de gravas menores al 50%, es considerado un flujo de barro (figura 2.1).

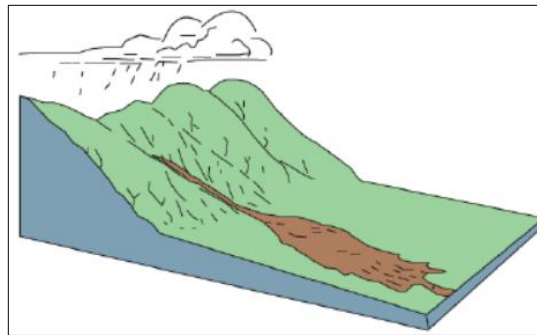


Figura 2.1. Esquema de flujo de detritos. Extraído y modificado de USGS (2004).

2.1.1.2 Desprendimiento o caídas

Son movimientos rápidos a extremadamente rápidos que se generan cuando el material rocoso o suelo se desprende de una ladera de alta pendiente. El material desprendido podrá alcanzar el pie del talud mediante caída libre, rodando o rebotando, dependerá principalmente de la forma del bloque y el ángulo de la pendiente del talud (Lara, 2007; Cruden y Varnes, 1996) (figura 2.2).

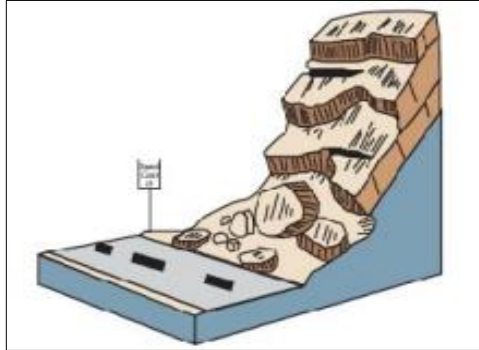


Figura 2.2. Esquema de caída de rocas. Extraído y modificado de USGS (2004).

2.1.1.3 Deslizamientos (rotacionales y traslacionales)

Es un movimiento ladero abajo de masas de suelo o roca a través de superficies de cizalle definidas. Pueden ser de tipo rotacional (figura 2.3A) que ocurren a lo largo de superficies curvas y cóncavas o traslacional (figura 2.3B) que se genera una superficie de cizalle aproximadamente plana. Entre los principales tipos de deslizamientos traslacionales figuran los deslizamientos en bloque, y en cuña (Lara, 2007; Cruden y Varnes, 1996).

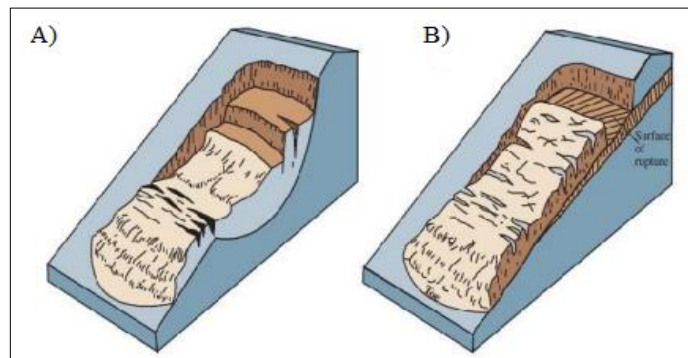


Figura 2.3. Deslizamiento rotacional (A) y traslacional (B). Extraído de USGS (2004).

2.1.1.4 Toppling o volcamientos

Corresponde al desprendimiento de uno o varios fragmentos de rocas o suelo mediante el volcamiento de éstos en torno a un punto o un eje bajo el centro de gravedad de la masa desplazada (Cruden y Varnes, 1996) (figura 2.4).

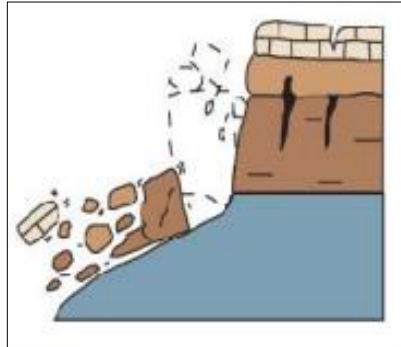


Figura 2.4. Esquema de Toppling o volcamientos. Extraído y modificado de USGS (2004).

2.1.1.5 Extensiones laterales

Se definen como la propagación lateral de una masa de suelo o roca combinada con una subsidencia general de la masa de material fracturado. Algunos tipos de extensión lateral corresponden a extensiones laterales en bloque y a extensiones por licuefacción del suelo (Lara, 2007; Cruden y Varnes, 1996) (figura 2.5).

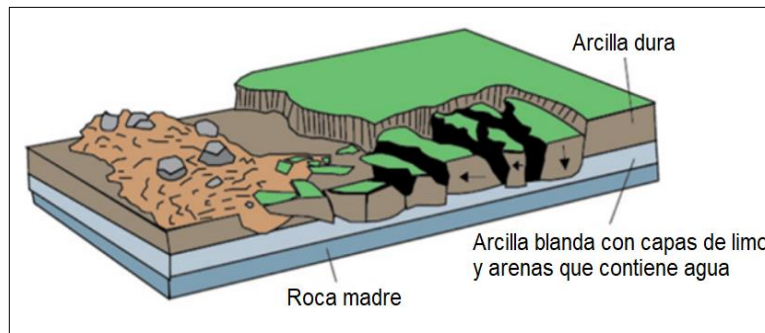


Figura 2.5. Esquema de extensiones laterales. Extraído y modificado de USGS (2004).

2.1.2 Factores condicionantes

Se refiere a aquellos elementos que determinan la estabilidad de una ladera debido a las propiedades naturales por las que están definidas. Entre los factores más relevantes según Hauser (2003) se encuentra la geología, geotecnia, geomorfología, hidrología e hidrogeología, la vegetación, clima y actividad antrópica.

Para cada tipo de remoción en masa los factores condicionantes varían según el comportamiento (tabla 2.1).

Tabla 2.1. Factores condicionantes para los distintos tipos de remociones en masa (Hauser, 1993)

Tipo de remoción en masa Factores Condicionantes	Cáidas	Deslizamientos	<i>Toppling</i>	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	

2.1.2.1 Geología y geotecnia

Los factores para estudiar la determinación de la susceptibilidad de remociones en masa, según Lara (2007), son la litología (tipo de roca, grado de meteorización y alteración) y geología estructural (presencia de fallas, pliegues, estratificación y sets estructurales dominantes). El tipo de depósito condiciona las características de su comportamiento, por ejemplo, los depósitos aluviales, coluviales, volcanoclásticos, glaciales y de escombros de falda son más susceptibles a ser removidos, ya que son depósitos permeables que infiltran con facilidad, pero al superarse en exceso su capacidad de infiltración, el agua escurre con gran energía provocando las remociones (Galloway y Hobday, 1983 ; Selby, 1993 ; Naranjo y Varela, 1996 ; Hauser, 1997a), además se debe considerar la densidad, plasticidad, humedad y permeabilidad de los depósitos. Las estructuras presentes en la zona, ya sean fallas y/o fracturas geológicas debilitan las rocas, generando material para ser movilizado por los flujos (Lecaros, 2021).

2.1.2.2 Geomorfología

Los rasgos geomorfológicos como la topografía, pendientes, extensión, altura y cambios fuertes de las laderas condicionan los eventos de remoción en masa (Sepúlveda, 1998). Estas características inciden en la velocidad, energía y volumen de las remociones que puedan originarse, por lo que cualquier modificación de estos puede transformar una ladera estable en inestable y generar remociones en masa (Popescu, 2002). Por otro lado, también influye la forma y superficie de la cuenca, orientación de laderas y su consecuente exposición al sol, lo que influirá junto con el efecto de los deshielos, la erosión y meteorización del material (Lara, 2007). La topografía escarpada y ángulos altos de pendientes de laderas es el primer factor geomorfológico a considerar, ya que la generación de flujos en laderas de alto ángulo, se relaciona al escurrimiento de agua superficial, el cual actúa como principal agente desestabilizador, considerando, además, la pendiente de los ejes hidráulicos (cauces y quebradas), mientras mayores son, otorgan una alta capacidad de transporte y energía a los flujos (Lara, 2007). Los tributarios cortos de alta pendiente, rectos y encajonados concentran el transporte del material incrementando su energía cinética (Jacoby, 2001). Las pendientes altas en las laderas, mayores a 25° en las cabeceras de las cuencas son favorables para los procesos de flujos de detritos (Hauser, 1993), aunque existen casos en que se pueden generar en pendientes menores a 15° (Sauret, 1987). La superficie de la cuenca receptora, así como su forma, es importante para determinar el tiempo de concentración del agua, siendo este mayor en cuencas alargadas que circulares (Garrido, 1987).

2.1.2.3 Hidrología e hidrogeología

Los factores que influyen en la generación de procesos de remoción en masa, están altamente relacionados con la incorporación de agua al suelo y/o roca, así como las características de los caudales, escorrentía, infiltración, permeabilidad, porosidad y posición del nivel freático; este último factor es importante ya que, debido a la infiltración durante eventos de precipitaciones o derretimientos de nieve, puede causar un ascenso en el nivel freático, saturando el suelo que lo subyace (Lara, 2007).

2.1.2.4 Clima y vegetación

Las condiciones climáticas están directamente relacionadas con la meteorización y erosión de la misma. Dentro de los factores climáticos considerados están las precipitaciones, viento, cambio de temperatura y radiación solar (Campos, 2014). En general, las situaciones climáticas más críticas se vinculan a la frecuencia y severidad de los fenómenos extremos, como sequías e inundaciones (Hauser, 2002). Los ambientes áridos y semiáridos son escenarios comunes de flujos de detritos (Polanski, 1966; Galloway y Hobday, 1983), pues las lluvias, si bien son escasas, suelen ser intensas y de corta duración.

La vegetación está vinculada a la humedad del área, un clima húmedo propiciará la presencia de cobertura vegetal, que además de reducir la erosión, puede en algunos casos ser una barrera natural de contención de material movilizado por remociones en masa (Muñoz, 2013). La cobertura vegetal actúa como una defensa contra la erosión, ya que protege el impacto directo de las gotas de lluvia, la dispersión y quiebre de la energía de las aguas de escurrimiento superficial (Bertoni y Lombardi Neto, 1985).

2.1.2.5 Actividad antrópica

Se refiere a todas las acciones y procesos que modifican el terreno por efecto de la actividad humana e impactan en el medio ambiente, para este factor se considera la generación de obras de construcción, cortes, terraplenes, plataformas, obras mineras, excavaciones, rellenos, acumulación de escombros, basura, deforestación, entre otros, que puede generar una disminución artificial gradual de la resistencia de los depósitos o macizos rocosos involucrados y generar inestabilidad en los terrenos aumentando la susceptibilidad a remociones en masa (Campos, 2014; Becerra, 2022). Si bien la acción del factor humano sobre el medio ambiente puede ser influyente en propiciar condiciones para la generación de flujos de detritos (Sepúlveda, 1998), también es posible que tenga un efecto positivo si se realizan los trabajos adecuados. Por ejemplo, obras de contención a taludes, construcción de bancos escalonados para disminuir las pendientes abruptas, entre otras soluciones que reducen la susceptibilidad de estos peligros geológicos (López, 2019).

2.1.3 Factores desencadenantes

Un agente gatillante o desencadenante es un factor externo que genera una respuesta traducida en una remoción en masa mediante el rápido incremento de esfuerzos o la reducción de la resistencia del material de una ladera (Wieczorek, 1996).

2.1.3.1 Precipitaciones

Para tomar en cuenta las precipitaciones, se deben considerar el volumen, intensidad y distribución de las lluvias (González de Vallejo *et al.*, 2002). Las precipitaciones de baja intensidad en periodos prolongados de tiempo, al igual que precipitaciones de alta intensidad en periodos cortos de tiempo podrían desencadenar eventos de remociones en masa (Becerra, 2022). La duración e intensidad de estos eventos van a establecer los tipos de remociones en masa que puedan ocurrir en un sector, debido a que precipitaciones cortas e intensas provocan remociones superficiales, mientras que eventos de lluvias de largo tiempo de duración generaría remociones más profundas (Aleotti, 2004; Kim *et al.*, 2004). Las superficies de áreas urbanas y zonas de suelos semiáridos, presentan una alta impermeabilidad por lo tanto baja infiltración, que en periodos de precipitaciones conllevan al escurrimiento de flujos superficiales (Lecaros, 2021).

2.2.3.2 Sismos

El régimen tectónico en el que se encuentra Chile, lo convierte en un país naturalmente sísmico (Campos, 2014). En particular, la placa Sudamericana converge con 2 placas oceánicas: Nazca (entre 18 y 45°S) y Antártica (entre 45 y 55°S) (Angermann *et al.*, 1999). Los sismos de mayor magnitud ocurren en la zona de subducción entre la placa Sudamericana con la placa de Nazca, como el sismo de Valdivia en el año 1960 (9.5 Mw), el de Maule en el año 2010 (8.8 Mw), Iquique en 2014 (8.2 Mw), entre muchos otros (Baez, 2020). Según González de Vallejo *et al.* (2002), los desprendimientos de bloques, deslizamientos, flujos y avalanchas de roca, son las remociones en masa más frecuentes producto de un fenómeno sísmico.

2.2 Conceptos claves

2.2.1 Susceptibilidad de remociones en masa

Expresa la posibilidad de que en una unidad geológica ocurra o no una remoción en masa, en un área determinada y en función de las condiciones locales del terreno (Brabb *et al.*, 1984; Sepúlveda, 1998).

2.1.3 Peligro geológico

Condición o proceso geológico potencialmente catastrófico. Igualmente se entiende por peligro a la probabilidad de que suceda un evento de este tipo durante un cierto periodo de tiempo en un sitio dado (Sepúlveda, 1998).

2.1.4 Riesgo geológico

Número esperado de vidas perdidas, personas damnificadas, daños a la propiedad, etc., que causaría la ocurrencia de un fenómeno peligroso (Varnes, 1984). Se expresa como producto de la probabilidad de ocurrencia del fenómeno por la vulnerabilidad y por el valor de los elementos bajo riesgo. A diferencia del peligro geológico, el riesgo se puede medir en unidades monetarias o por medio de algún índice similar (Sepúlveda, 1998).

2.1.5 Vulnerabilidad

Grado de daños potenciales y el nivel de preparación que presentan los asentamientos como ubicación, número y tipo de habitantes, calidad de las edificaciones, capacidad de respuesta de la población, entre otros (Muñoz, 2013).

2.1.6 Mitigación

Medidas estructurales o no-estructurales emprendidas para reducir el impacto negativo de amenazas naturales y degradación ambiental. Por ejemplo, piscinas de decantación para el caso de posibles aluviones (SERNAGEOMIN, 2015).

2.3 Evaluación de la susceptibilidad de remociones en masa

2.3.1 Flujos de detritos

Los factores condicionantes son la base para la aplicación de la metodología de Lara (2007), ya que se le asigna un valor porcentual a cada uno de los factores, teniendo cada uno un desglose (anexo 1), como se observa a continuación (tabla 2.2):

Tabla 2.2. Ponderación máxima de factores condicionantes de flujos de detritos. Extraído de Lara (2007).

Factor		%
Geomorfología	Pendientes de laderas	35%
	Pendientes de 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%

El índice de susceptibilidad (IS) de flujos de detritos asociado a cada unidad geomorfológica, que se expresa en la siguiente ecuación:

$$IS_{FD} = \left(\sum_{i=1}^{11} f_i \right) \times f_{12}$$

Posteriormente, se obtiene un valor de 0% a 100%, en los que se consideran los siguientes rangos para el índice de susceptibilidad (IS):

- $IS \geq 50\%$, es altamente susceptible a la generación de flujos.
- $25\% \leq IS < 50\%$, es medianamente susceptible a la generación de flujos
- $IS < 25\%$, no es susceptible a la generación de flujos.

2.3.3 Deslizamientos en roca

En la tabla 2.3, se observa la máxima ponderación de cada factor, en base a Lara (2007). El desglose de los diversos rangos dependiendo de la unidad, se encuentra en el anexo 2.

Tabla 2.3. Ponderación máxima de factores condicionantes de deslizamientos en roca (Lara, 2007)

Factor		%
Geomorfología	Pendientes de laderas	35%
Geología-geotecnia	Características geológicas-geotécnicas del material	35%
Clima	Acumulación de nieve	10%
Antrópico	Desestabilización artificial de laderas	5%
Antecedentes	Caídas de rocas declaradas en la ladera	15%

Las zonas con suelo superficial > 1m-1.5 m deberían tener siempre un $f_6 = 1$, pues podrían generar tanto deslizamientos superficiales de suelo como deslizamientos de roca y/o caídas de roca. El cálculo del IS, se obtiene con la siguiente ecuación:

$$IS_{CR} = \left(\sum_{i=1}^5 f_i \right) \times f_6$$

2.3.2 Desprendimientos o caídas de rocas

En la tabla 2.4, se observa la ponderación máxima de cada factor (Lara, 2007). En el anexo 3, se muestran los factores desglosados en los diversos rangos para cada unidad.

Tabla 2.4. Ponderación máxima de factores condicionantes de caídas de rocas (Lara, 2007).

Factor		%
Geomorfología	Pendientes de laderas	35%
Geología-geotecnia	Características geológicas-geotécnicas del material	35%
Clima	Acumulación de nieve	10%
Antrópico	Desestabilización artificial de laderas	5%
Antecedentes	Caídas de rocas declaradas en la ladera	15%

Para calcular el índice de susceptibilidad (IS) de cada unidad geomorfológica, se considera sólo las unidades de roca, excluyendo las de suelo, ya que estas últimas la susceptibilidad será nula o cero. El IS se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$IS_{CR} = \left(\sum_{i=1}^5 f_i \right) \times f_6$$

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

El análisis de susceptibilidad para el área de estudio se realizará mediante las tres primeras etapas de la metodología de Lara (2007) que se detallan a continuación:

3.1 Etapa de Gabinete I

Esta primera etapa consistió en una revisión y recopilación de la bibliografía del área de estudio, además de la revisión de imágenes satelitales, artículos de prensa, fotografías y videos, con el fin de identificar los tipos de fenómenos de remoción en masa presentes en el área de estudio.

En relación a los factores condicionantes como la geología y geotecnia, se utilizó la carta y hoja Castilla y Totoral Bajo (Blanco *et al.*, 2003) a escala 1:100.000, bibliografía e imágenes obtenidas de la aplicación de Google Earth la cual utiliza imágenes satelitales de Landsat 8 con una resolución 30 metros por píxel y Landsat 9 con una resolución 15 metros por píxel. Simultáneamente se confeccionó una base de mapeo a través del software ArcMap 10.8.2 a partir de una imagen satelital del satélite Sentinel-2 con una resolución 10 metros por píxel georeferenciada según el sistema de coordenadas WGS84-UTM obtenida del programa SAS-Planet.

Para la geomorfología del área de estudio los factores de mayor relevancia que se consideraron son las pendientes de laderas, alturas, exposición al sol y geometrías asociadas, por lo que se obtuvieron dos mapas temáticos a través del software ArcMap 10.8.2 a partir de un modelo de elevación digital (DEM) obtenidos del satélite ALOS PALSAR (Advanced Land Observing Satellite) de una resolución de 12.5 metros por píxel.

Con respecto a la hidrología e hidrogeología, se utilizó el software Global Mapper 20 para identificar las principales redes de drenaje y se realizó el mapa de cauces principales y redes de drenaje con el software ArcMap 10.8.2

La vegetación del área de estudio se identificó a partir de un modelo de elevación digital (DEM) obtenido del satélite Landsat 8 de una resolución de 30 metros por píxel. Posteriormente con el software ArcMap 10.8.2 se utilizó la combinación de bandas (5-4) / (5+4) para obtener el mapa con índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el cual se utiliza para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación.

En relación a la actividad antrópica se identificó a partir de un modelo de elevación digital (DEM) obtenido del satélite Landsat 8 de una resolución de 30 metros por píxel. Luego con el software ArcMap 10.8.2 se utilizó la combinación de bandas 6,5,2 para obtener el mapa de usos agrícolas y la combinación de bandas 7,6,4 para el mapa de color falso para detección de zonas urbanas.

Para los factores desencadenantes como las precipitaciones, se utilizaron reportes meteorológicos de la página web de la Dirección General de Aguas (DGA) e información de la Oficina Nacional de Emergencia (ONEMI).

3.2 Etapa de terreno

Esta etapa consistió en dos periodos de terreno (mapeo geológico básico), el primero los días 20 y 22 de diciembre de 2023 y el segundo periodo los días 5,6 y 8 julio de 2024. Mediante estas campañas de terreno se buscó complementar y verificar la información obtenida en la etapa de Gabinete I, para los siguientes factores condicionantes:

1. Geología: se verificó lo de etapa I y se realizó una descripción litológica de las unidades, el grado de meteorización y asociaciones de alteración, además de la geología estructural, como la descripción de estructuras y sus características.
2. Geotecnia: Para el macizo rocoso la caracterización se realizó mediante inspección visual con la planilla basada en parámetros como el GSI (índice de resistencia geológica) por Hoek y Marinos (2000) evaluando las características de fracturación, el tamaño de bloques formado por las familias de discontinuidades y las condiciones de las discontinuidades, que hace referencia a la alteración, persistencia y rugosidad de las mismas (anexo 4). Por otro lado, para las propiedades geotécnicas de suelo, se consideraron parámetros como la clasificación USCS³, plasticidad, permeabilidad y humedad. Estos parámetros se realizaron mediante observación y descripción visual. Según la metodología de Lara (2007) para estimaciones relativas de la plasticidad, se realiza el *ensaye de sacudimiento* que consiste si al humedecer y vibrar la muestra ésta cambia

³ USCS: United Soils Clasification System (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos)

rápidamente de forma y el agua aflora a la superficie, es un limo de baja plasticidad. Si no ocurre, es una arcilla de mediana a alta plasticidad. Luego se realiza el *ensaye de amasado* tras el ensayo de sacudimiento, se amasa la muestra hasta formar un bastón de 3 mm de diámetro. Si se rompe con poco amasado, indica baja plasticidad; si requiere más tiempo y esfuerzo, indica alta plasticidad y finalmente *brillo* una vez que el bastón alcanza la humedad que lo lleva a romperse, se forma un grumo cohesivo y se presiona contra la uña. Un brillo intenso en la superficie indica alta plasticidad. En tanto, la permeabilidad está asociada principalmente a la mayor o menor proporción de finos que tenga el suelo, mientras menos cantidad de finos tenga el suelo y/o mejor seleccionado sea más permeable será. Para todos los casos, excepto para la distribución granulométrica, los términos para categorizar estos parámetros en esta etapa son “alta”, “media” o “baja”

3. Geomorfología: se comprobó lo observado en la etapa de Gabinete I y se delimitaron unidades morfológicas del área de estudio como por ejemplo depósitos aluviales recientes, depósitos aluviales antiguos, áreas más susceptibles a movilizarse, etc.
4. Hidrología e hidrogeología: se verificó lo realizado en la etapa de Gabinete I, identificando los principales cauces y quebradas.
5. Vegetación del lugar: las características que se consideraron son el tipo de vegetación presente, diferenciando entre árboles, arbustos, hierbas y cactus, así como su densidad en términos relativos.
6. Actividad antrópica: se generaron observaciones del tipo de actividad presente en la zona, como por ejemplo volúmenes de material removido, actividades que se relacionen a erosión y obstrucción de canales y/o quebradas, como el uso de suelos (agrícola, residencial, industrial), etc.

Para recolectar información, se realizó una encuesta a los habitantes de Totoral y Perales, con el propósito de identificar el impacto de los aluviones ocurridos en los años 2015, 2017 y 2022. En la encuesta se realizaron preguntas abiertas y cerradas, las cuales se detallan en el anexo 13. Con los datos obtenidos se analizó los patrones y tendencias a los que se encuentran expuestos los habitantes.

3.3 Etapa de gabinete II

En la etapa final del trabajo, todos los resultados obtenidos de los factores condicionantes en gabinete I se integraron con la información obtenida de la etapa de terreno. Para la geología se realizó un mapa de unidades litológicas con los puntos y para la vegetación se complementó el mapa realizado en la etapa de gabinete I con lo obtenido en terreno.

La etapa de definición de unidades geomorfológicas, consistió en dividir la zona de estudio en diferentes unidades según rasgos geomorfológicos y geológicos. Posteriormente se realizó el cálculo del índice de Susceptibilidad (IS) descrito en capítulo II (sección 2.3). Para cada polígono se analizaron los siguientes factores que se detallan en el anexo 1 con sus respectivos porcentajes:

1. Pendiente de laderas (f1) se realizó un recorte del modelo de elevación digital correspondiente a cada polígono. Posteriormente se calculó la pendiente con la herramienta “slope” del software ArcMap 10.8.2 obteniéndose el promedio de la unidad (pendiente media).
2. Pendiente canal de drenaje al pie de la ladera (f2) al ser sólo canal de drenaje, se asoció al factor 1.
3. El factor encajonamiento del canal de drenaje (f3) se obtuvo mediante la relación profundidad/ancho del canal. El valor de encajonamiento se clasificó de la siguiente manera:
 - Encajonamiento alto: $f3 \geq 0.7$.
 - Encajonamiento medio: $0.35 \leq f3 < 0.70$.
 - Encajonamiento bajo: $f3 < 0.35$.
4. El factor de exposición al sol (f4) para el caso del norte de Chile, alta exposición: laderas mirando al N, al estar expuestas al sol durante todo el año. Parcial: laderas mirando al E-W. Baja: laderas mirando al S.

5. Para el factor geología-geotecnia (f5) para el caso de la roca, no se incluyeron los valores del GSI asociados a la estructura del macizo rocoso con condiciones superficiales de regulares a buenas. En cuanto al suelo, se incluyeron parámetros como la clasificación USCS, plasticidad, permeabilidad y humedad, debido a que, para la generación de flujos se consideró el material disponible para ser removido durante eventos de precipitaciones intensas.
6. Redes de transporte gravitacional de agua (f6) se consideraron los drenajes secundarios y evidencias de llanuras de inundación.
7. Acumulación de nieve (f7) se otorgó un valor según la estacionalidad, es decir, si es nula, esporádica, estacional o siempre.
8. Cobertura vegetal (f8) se utilizó la información descrita en el capítulo IV, sección 4.1.4, se clasificó la densidad de la vegetación en tres categorías: nula a baja, moderada y alta, según corresponda a cada polígono.
9. Obstrucción de canal de drenaje (f9) se refiere a la incapacidad del sistema de drenaje para permitir el flujo del agua, como por ejemplo viviendas, plantaciones de árboles, etc.
10. Desestabilización artificial de laderas (f10) se analizaron cortes artificiales en laderas, construcción de terraplenes, etc.
11. Aluviones declarados en la hoya hidrográfica (f11) se analizó la información escrita y/o las observaciones en terreno de depósitos de flujos de detritos en el área de estudio. Considerando como frecuentes aquellos con recurrencia ≤ 10 años.

Cada polígono se detalla en la tabla 4.4 y finalmente, se elabora un mapa de índice de susceptibilidad de flujos de detritos a escala de 1:20.000 (anexo 19).

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

4.1 Análisis de factores condicionantes

4.1.1 Geología y geotecnia local

Las principales unidades litológicas se describieron en el capítulo I, sección 1.5 y se complementaron con un mapa de unidades litológicas incluido en el anexo 5. Mediante observaciones en terreno se identificaron las principales características geológicas y geotécnicas presentes, ordenadas desde las formaciones más antiguas a las más recientes, que se detallan a continuación:

4.1.1.1 Unidad metamórfica

Denominación, distribución y relaciones de contacto

Se encuentra conformada por una secuencia de rocas metamórficas de bajo grado, tiene una gran extensión en el área de estudio, distribuyéndose en el margen occidental del área. Hacia el oeste esta intruido por la unidad intrusiva (a) y se encuentra cubierto discordante por las gravas rojizas y parcialmente por los depósitos aluviales recientes y hacia el sureste cubierto por depósitos eólicos (figura 4.1).

Litología

El área de estudio se reconocen pizarras, filitas y hornfels/corneanas, dependiendo de la ubicación. Las pizarras, corresponden a rocas foliadas, de color negro, con un tamaño de grano muy fino y con un 5% micas. Asimismo, se identificó las filitas, de color negro, con un tamaño de grano fino, presenta foliación y también tiene un 10 % micas (anexo 6.1). Por otro lado, los hornfels corresponden a rocas metamórficas de contacto, de color café claro con tonalidades de negro, de textura granoblástica, compuesta por pequeños fragmentos de feldespatos potásico y cuarzo, con presencia de patinas de óxido de Fe (jarosita) (anexo 6.2).

Clasificación del macizo rocoso

Las unidades rocosas que afloran en la ruta C-416 fueron las que se utilizaron principalmente para realizar la clasificación (figura 4.1). Los valores de GSI varían entre 65 y 70, lo que indica levemente fracturado / bueno (estructura del macizo / condiciones superficiales). Las superficies de las rocas son rugosas, está levemente meteorizada y alterada a óxido de Fe. El macizo rocoso no está disturbado, levemente fracturado, muy bien entrelazado y constituido por bloques cúbicos formado por tres familias de discontinuidades.



Figura 4.1. Afloramiento de rocas competentes de la unidad metamórfica. Fuente: propia.

4.1.1.2 Unidad intrusiva (a)

Denominación, distribución y relaciones de contacto

Corresponde a un extenso cuerpo intrusivo diorítico de color gris claro (figura 4.2), está situado al este del área de estudio, con dirección NE-SW. Al norte se encuentra cubierto por depósitos eólicos, al oeste intruye a la unidad metamórfica y al este se encuentra en contacto con la unidad intrusiva (b), en el centro y sur del área sobre esta unidad se depositan las gravas rojizas y el depósito aluvial reciente.

Litología

En el área de estudio se reconocen cuarzo dioritas según Streckeisen (1979) (anexo 6.3). El cuarzo diorita corresponde a una roca ígnea intrusiva, holocristalina, fanerítica e inequigranular, el tamaño de estos cristales es medio a grueso. La roca está compuesta por 14 % cuarzo, 73% plagioclasa y 13 % de máficos. El cuerpo presenta variaciones granodioríticas tonalíticas, además se encuentran cortado por diques dioríticos (figura 4.3) de color verdoso con orientación noreste y noroeste, los cuales se encuentran alterando levemente a la roca.



Figura 4.2. Unidad intrusiva (a). Fuente: propia.

Clasificación del macizo rocoso

La clasificación se realizó principalmente en las unidades rocosas que afloran en el trazado de la ruta C-416 (figura 4.3), los valores de GSI varían entre 45 y 50, lo que indica moderadamente fracturado / regular (estructura del macizo / condiciones superficiales). Las discontinuidades presentan superficies lisas, moderadamente meteorizadas y alteradas a óxidos de Fe. El macizo rocoso se encuentra parcialmente disturbado con bloques angulosos de varias caras, moderadamente fracturado, entrelazado y formado por 4 familias de discontinuidades.



Figura 4.3. Marcado con color rojo se observa el dique diorítico intruyendo a la Unidad intrusiva (a).
Elaboración propia.

4.1.1.3 Unidad intrusiva (b)

Denominación, distribución y relaciones de contacto

Es un cuerpo tonalítico de color gris claro (figura 4.4), se encuentra expuesto al este del área como núcleo de la unidad intrusiva (a) con una orientación NE- SW. Al oeste tiene contacto con la misma unidad y está cubierto por depósitos eólicos. En el centro y sur, está cubierto por depósitos aluviales recientes y antiguos, así como por la unidad de gravas (rojizas y grises).

Litología

En el área de estudio se reconocen tonalitas según Streckeisen (1979) (anexo 6.4). La tonalita corresponde a una roca ígnea intrusiva holocristalina, fanerítica e inequigranular, el tamaño de los cristales es medio. La roca está compuesta por 30 % cuarzo, 55% de plagioclasa y 15% de máficos. Esta unidad presenta variaciones composicionales de granodioritas y dioritas cuarcíferas y lo intruyen diques de composición dioríticos (figura 4.5), con orientación NW-SE.



Figura 4.4. Unidad intrusiva (b). Fuente: propia.

Clasificación del macizo rocoso

La clasificación se realizó principalmente en las unidades rocosas que afloran en el trazado de la ruta C-418 (figura 4.5), los valores de GSI varían entre 40 y 45, lo que indica moderadamente fracturado / regular (estructura del macizo/condiciones superficiales). La roca presenta superficies lisas, moderadamente meteorizadas y alteradas, además se observa el macizo rocoso parcialmente disturbado con bloques angulosos de varias caras, moderadamente fracturada, entrelazado, formado por 4 familias de discontinuidades.



Figura 4.5. Unidad intrusiva (b) con intrusión de diques dioríticos (marcados de color rojo). Elaboración propia.

4.1.1.4 Unidad de gravas

Gravas grises

Denominación, distribución y relaciones de contacto

Corresponde a gravas grises oligomícticas a polimícticas con alternancias de arenas, semi a mal consolidadas que se reconocen como terrazas fluviales en la quebrada Total (figura 4.6). Se ubican en sector sureste del área de estudio, en contacto erosivo con las gravas rojizas, el depósito aluvial antiguo y cubriendo parte de la unidad intrusiva (b).

Litología y potencia

Gravas con intercalaciones de arenas de tamaño medio a grueso, estas gravas están compuestas por fragmentos de tonalitas, granitos y andesitas, poseen un diámetro promedio de 5 cm, alcanzando un máximo de 7 cm, presentan formas que varían de subangulares a subredondeados y su selección es moderadamente a bien seleccionada. En su mayoría, son de tipo clasto soportado y su matriz cambia de limo a arenas medias con una fábrica que varía de anisótropa a isótropa. Corresponde a un suelo arenoso. La potencia aproximada es de 2,5 m. El detalle de cada capa se encuentra en la columna estratigráfica incluida en el anexo 7.2.



Figura 4.6. Fotografía representativa de las gravas grises. Fuente: propia.

Gravas rojizas

Denominación, distribución y relaciones de contacto

Corresponde a gravas rojizas polimícticas con alternancias de arenas, semi a mal consolidadas que se reconocen como terrazas (figura 4.7). Se ubican en la quebrada Totoral y en sus afluentes de segundo orden, en contacto erosivo con las gravas grises y depósitos aluviales (antiguos y recientes), y se depositan sobre las unidades intrusivas (a) y (b) y la unidad metamórfica.

Litología y potencia

Constituida por gravas con intercalaciones de arenas de tamaño medio a gruesas. Las gravas están compuestas por dioritas, tonalitas y granitos, poseen un diámetro promedio de 5 cm y un máximo de 18 cm, presentan formas que cambian de subangular a angular y su selección es moderadamente a pobremente seleccionada, varían de matriz soportada a clasto soportado, con una fábrica isotropa. Corresponde a un suelo arenoso (cantidad menor a un 2%). Su potencia aproximada es de 1.5 a 5 m. Para más detalle de cada capa, se incluye la columna estratigráfica en el anexo 7.3



Figura 4.7. Fotografía representativa de las gravas rojizas. Fuente: propia.

4.1.1.5 Depósitos aluviales antiguos

Denominación, distribución y relaciones de contacto

Depósitos constituidos por gravas oligomíticas con alternancia de arenas, semi consolidados (figura 4.8), presentes mayoritariamente en el sector noreste del área de estudio, se encuentra en contacto erosivo con la unidad de gravas y el depósito aluvial reciente, y se deposita sobre la unidad intrusiva (a).

Litología y potencia

Compuesta por gravas con intercalaciones de arenas finas a gruesas. Las gravas están compuestas por clastos de dioritas y tonalitas, con un diámetro promedio de 5 milímetros y un máximo de 5 centímetros, los clastos poseen un grado de redondeamiento de subangular a subredondeados y un grado de selección de moderado a bien seleccionado, varían de matriz a clasto soportada. Corresponde a un suelo arenoso. La potencia de aproximada varía de 1.74 a 3 metros, en la columna estratigráfica del anexo 7.4 se describe el detalle de cada capa.



Figura 4.8. Fotografía representativa de los depósitos aluviales antiguos. Fuente: propia.

4.1.1.5 Depósitos aluviales recientes

Denominación, distribución y relaciones de contacto

Depósitos no consolidados, constituidos por gravas de composición polimíctica (figura 4.9), ubicados en la quebrada Totoral y quebradas secundarias formando terrazas. Se encuentran en contacto erosivo con los depósitos aluviales antiguos y cubre a la unidad metamórfica, la unidad intrusiva (a) y (b) y la unidad de gravas.

Litología y potencia

Sedimentos no consolidados de tamaño grava a bloque, inmersos en una matriz de arena y limo con intercalaciones de arena de tamaño fino a grueso. Los clastos están constituidos por tonalitas, filitas, esquistos, granodioritas y andesitas, con un grado de redondeamiento de angular a muy angular, muy pobremente seleccionado y sin orientación preferencial. Corresponde a un suelo arenoso (cantidad menor a un 2%). La potencia es de 3 metros aproximadamente, se detalla cada capa de la columna estratigráfica en el Anexo 7.5.



Figura 4.9. Fotografía representativa de los depósitos aluviales recientes. Fuente: propia.

4.1.1.6 Depósitos eólicos

Denominación, distribución y relaciones de contacto

Corresponden a arenas no consolidadas (figura 4.10), que se localizan al norte de las localidades de Totoral y Perales (noroeste del área de estudio). Se encuentran cubriendo a la unidad metamórfica, la unidad intrusiva (a) y (b) y a la unidad de gravas rojizas.

Litología y potencia

Depósitos no consolidados, de arenas finas a medias, bien seleccionadas, con un espesor de 30 centímetros, depositadas como mantos de arenas o dunas. Corresponde a un suelo arenoso.



Figura 4.10. Depósitos eólicos (marcado de color rojo) cubriendo a la unidad intrusiva (b). Fuente: Propia.

4.1.1.7 Geología estructural

En el área de estudio, mediante el uso de fotointerpretación y observaciones directas en terreno, se identificaron diversas estructuras de deformación frágil (figura 4.11 y figura 4.12). Estas estructuras representan rasgos importantes de la dinámica tectónica y evolución del terreno. Para mayor detalle, se adjunta el mapa de geología estructural en el anexo 8, donde se muestran la distribución y orientación de estas estructuras. La geología estructural fue incorporada al analizar el índice de resistencia geológica (GSI) del macizo rocoso. Sin embargo, es importante señalar que, dentro del análisis de las características geológicas-geotécnicas, no se consideró el macizo rocoso con condiciones de discontinuidades de regular a buena. Esto se debe a que el enfoque principal del estudio se basa en zonas de aporte de material disponible para ser removido mediante flujos de detritos. Por esta razón, la fotointerpretación se centró en identificar estructuras y lineaciones más predominantes, las cuales se detallan a continuación:

Fallas principales

La estructura principal (1) se define como una falla de rumbo NW- SE, con sentido de movimiento dextral. Esta falla se extiende en toda el área de estudio cruzando la quebrada Totoral. Sin embargo, no se han identificado indicadores cinemáticos, tales como brechas de falla, estrías de fallas, fibras de relleno u otras evidencias.

En la parte noroeste del área de estudio se identifica otra estructura relevante (2), que corresponde a una falla observada de rumbo NE-SW. Esta falla presenta un desplazamiento horizontal de tipo sinistral. Según Blanco *et al* (2003) corresponde a una banda milonítica que es el margen del cuerpo Tonalita Las Zorras que estaría en contacto al noroeste y sur con la Diorita Cuarcifera Sierra Colorada. Las bandas miloníticas comúnmente presentan una gran cantidad de evidencias de mecanismos de deformación plástica por el deslizamiento por fricción y trituración de grano. Aunque esta falla es observada, no cuenta con mediciones precisas debido a que su traza en el área de estudio se encuentra cubierta por depósitos eólicos.

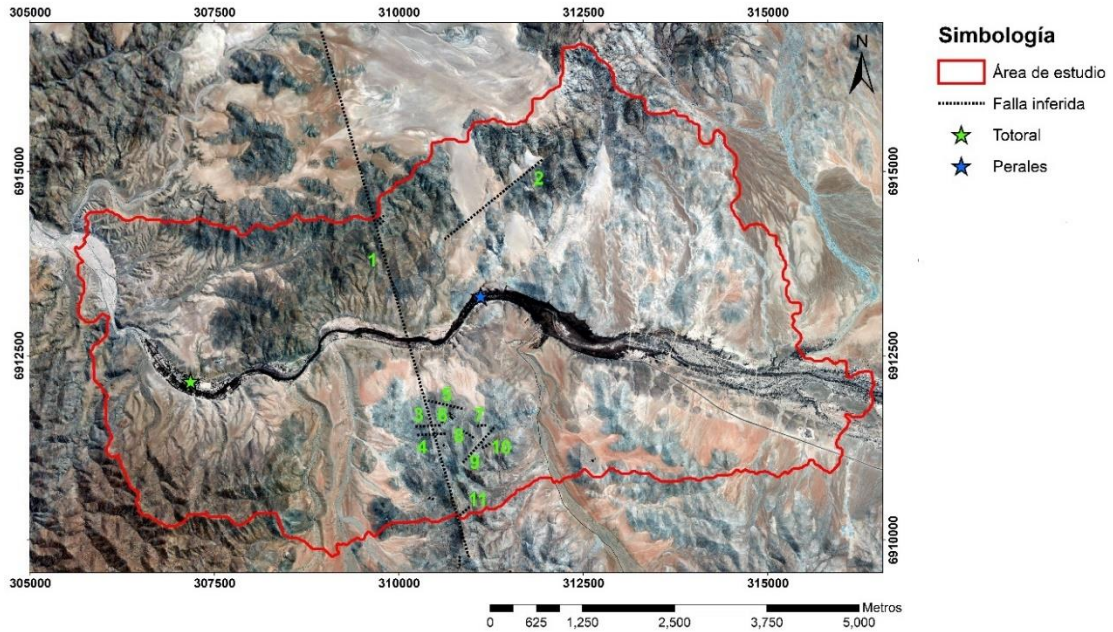


Figura 4.11. Falla de rumbo con orientación NW-SW (1) y falla de rumbo con orientación NW-SE (2).
Elaboración propia.

Fallas menores

Como se describió anteriormente, la zona se constituye por distintas fallas de rumbo, estas se ubican en la unidad intrusiva (a) cerca de la falla principal con orientación E-W, NE-SW y NW-SE, algunas de las cuales desplazan a los diques dioríticos como se observa en la figura 33, cuyo deslizamiento es de algunos metros (figura 4.12).

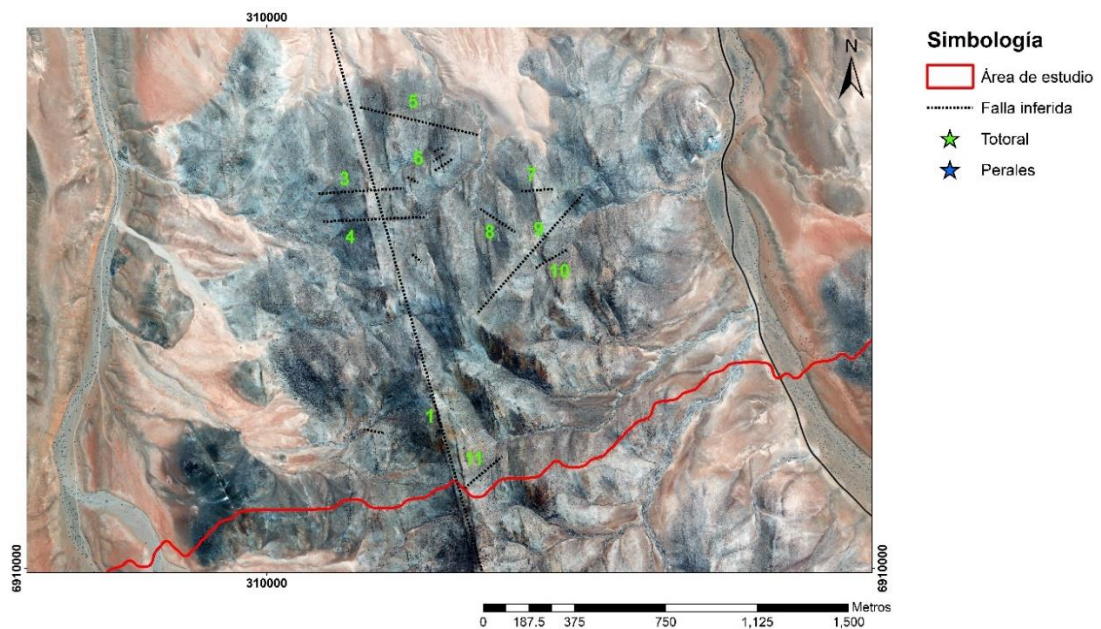


Figura 4.12. Fallas de rumbo menores en la unidad intrusiva (a). Elaboración propia.

4.1.2 Geomorfología

El área de estudio se encuentra en la pampa transicional, con una superficie de 43.7 km², los altos topográficos son perteneciente a la sierra Colorada, están comprendidos entre los 660 y 675 metros sobre el nivel del mar.

Los rasgos geomorfológicos, tales como las pendientes de las laderas, la altura, la orientación de laderas, la geometría y su consecuente exposición al sol pueden ser analizados mediante la generación en SIG de un modelo de elevación digital (DEM). En el anexo 9.1 se detalla el mapa de pendientes que se observa en la figura 4.13, en el cual la mayoría de las áreas presentan pendientes que varían entre los 0 y 10°. Estas pendientes son características de sectores llanos y de baja altura como la quebrada Totoral y sus afluentes secundarios. Cabe destacar, que según la metodología aplicada (Lara, 2007), estas pendientes no se consideran para la generación de flujos de detritos. Por otro lado, se identifica que las zonas de mayor pendiente se sitúan en el sector noreste con un promedio de 9.3° y un valor máximo de 38.6° en toda el área estudiada.

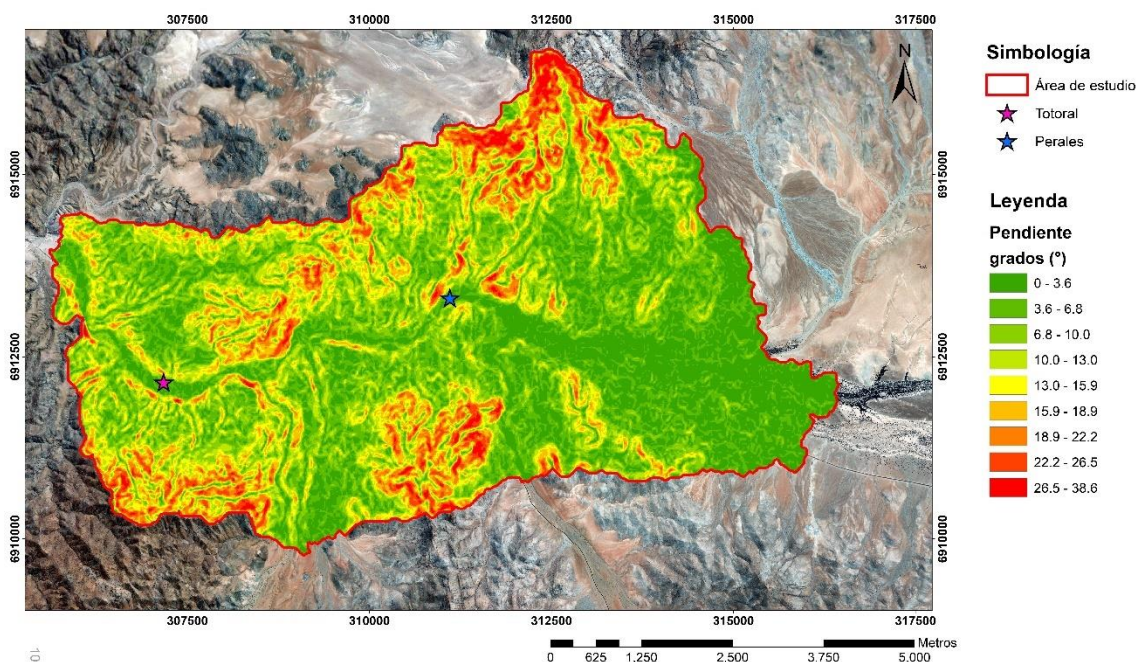


Figura 4.13. Mapa de elevación digital de las pendientes de la zona de estudio. Elaboración propia.

En la figura 4.14 se observa el mapa de exposición solar, el cual se detalla en el anexo 9.2. Este mapa muestra la relación con la orientación de laderas y una radiación solar equitativa en toda el área. En la parte norte de la zona de estudio, se observa una predominancia de laderas que se orientan hacia el sur, oeste y este, mientras que en la zona sur la mayoría de las laderas se encuentran orientadas hacia el este y oeste. Este factor influye en la cantidad de vegetación, ya que se ha observado que en laderas que miran hacia el norte presentan una menor vegetación en comparación con las demás laderas. Esto se debe a que el sol se desplaza de este a oeste, de modo que las laderas con orientación norte reciben una mayor radiación solar directa, lo que dificulta que el suelo conserve la humedad, un aspecto fundamental para el crecimiento de la vegetación.

Se debe tener en consideración que la radiación solar tiene un comportamiento estacional: durante el verano, las laderas orientadas hacia el oeste reciben una mayor cantidad de radiación, mientras que, en invierno, son las orientadas hacia el este.

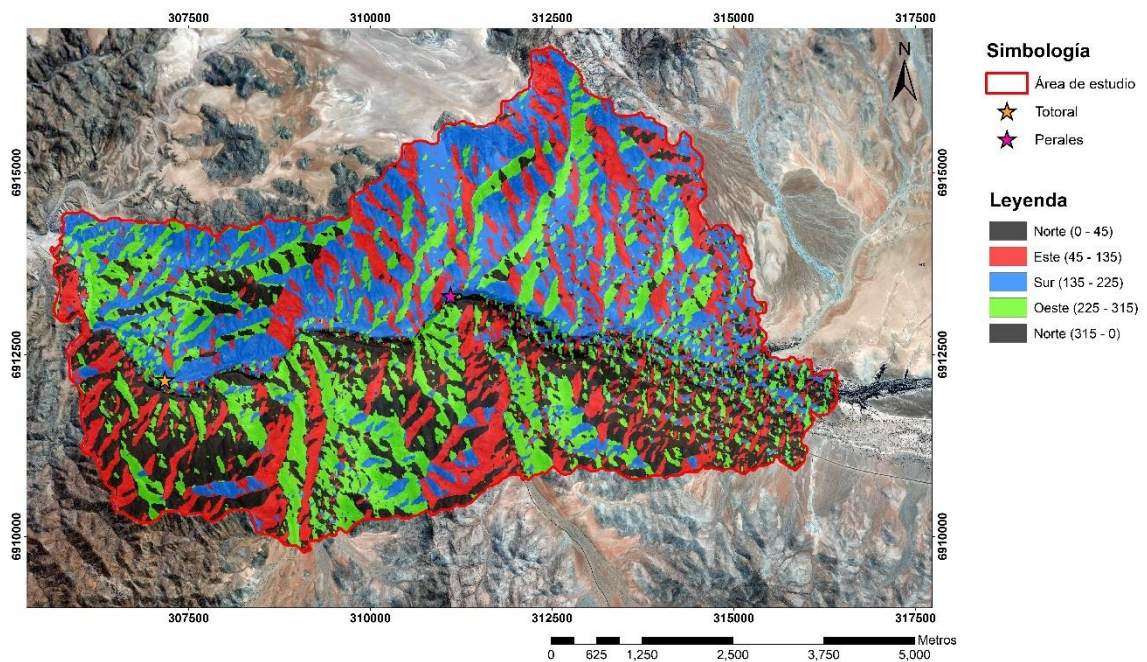


Figura 4.14. Mapa de la exposición solar según la orientación de laderas. Elaboración propia.

4.1.3 Hidrología e hidrogeología

El área de estudio se ubica en subcuenca de la quebrada Totoral y Costeras hasta quebrada Carrizal, con un área de 5944,3 km² según la DGA (Tapia, 2014). En la figura 4.15 se observan los principales cauces del sector (para mayor detalle, se adjunta el mapa en el anexo 10) corresponden a las siguientes quebradas:

- Quebrada Totoral
- Quebrada del Carbón
- Quebrada la Laguna
- Quebrada Varilla
- Quebrada del Loro
- Quebrada del Central

De las quebradas mencionadas anteriormente, ninguna presenta una escorrentía continua durante el año, se asocian a caudales superficiales y esporádicos que dependen de las precipitaciones en periodos estivales. Las redes de drenajes que se pueden identificar en el área de estudio son las redes dendríticas y paralelas, que actúan como tributarios al cauce principal (quebrada Totoral).

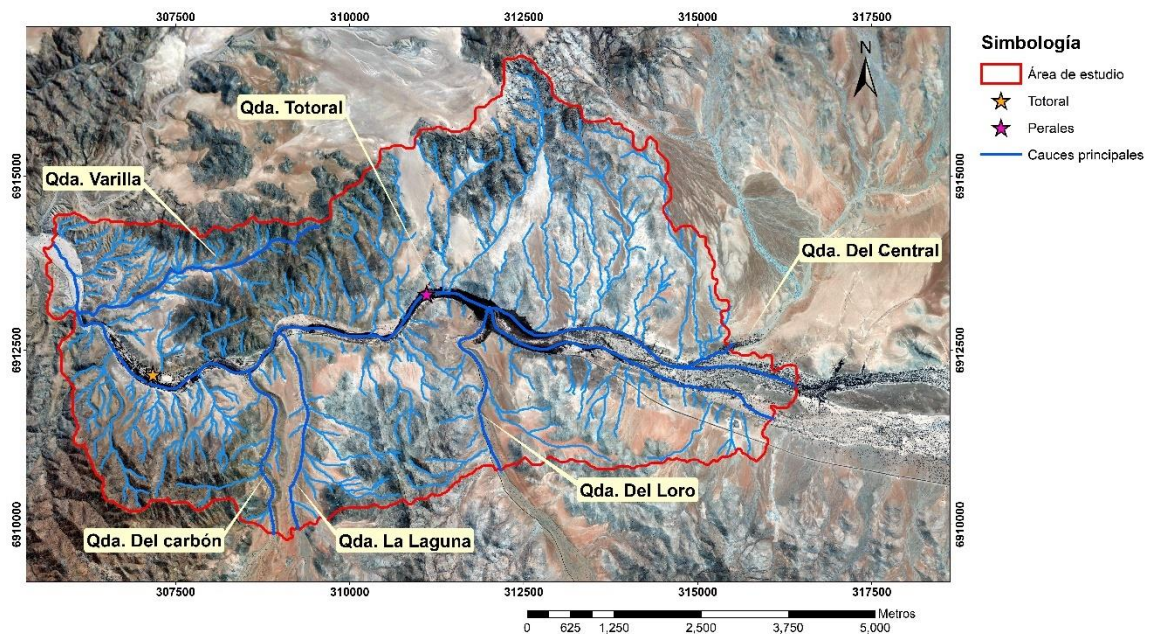


Figura 4.15. Cauces principales y redes de drenajes modificadas del software Global Mapper 18.
Elaboración propia.

4.1.4 Clima y vegetación

El clima de la zona de estudio se clasifica como “clima desértico con nubosidad abundantes” (figura 4.16) definido por Köppen (1948). Las precipitaciones en la región son de manera escasa, concentradas principalmente en los meses de invierno (junio a agosto). La principal característica de este clima es la abundante nubosidad matinal, las temperaturas anuales son de 16,1°C con la humedad relativa de 74% y la distribución depende directamente de la altitud y distancia a la costa.

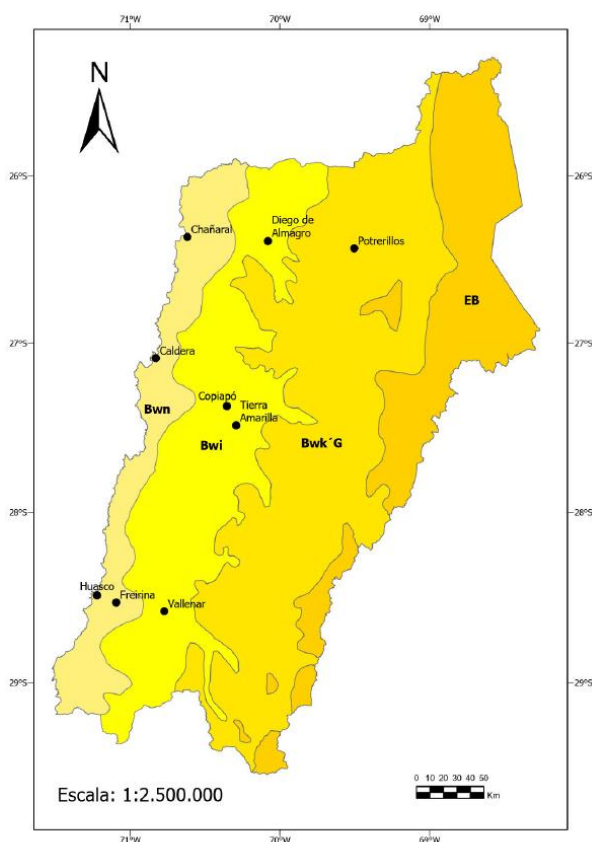


Figura 4.16. Franjas de los tipos de clima de la región de Atacama: clima desierto costero con nubosidad abundantes (Bwn), clima desértico transicional (BWi), clima desierto Frío de montaña (BWk'G) y clima de tundra de alta montaña (EB). Modificado de Köppen (1948).

La cobertura de la vegetación en la zona es escasa y varía entre un 10% en las planicies y terrazas secas del lugar y un 90% en el fondo de la quebrada Totoral, tal como se detalla el mapa con índice de vegetación de diferencia normalizada (anexo 11). Este mapa muestra la distribución y tipo de vegetación dominante en la quebrada Totoral, que incluye árboles, arbustos, hierbas y cactus adaptados al entorno (figura 4.17). Sin

embargo, también hay árboles frutales (como olivos, duraznos, damascos, etc.) en las viviendas del sector. No obstante, estos árboles no se consideraron parte de la vegetación predominante, ya que dependen del regadío de los habitantes para sobrevivir. En cuando a la vegetación dominante, se destaca la especie *Eucalyptus globulus* (figura 4.17 A), que tiene un porte recto y hojas ovaladas y falciformes, pudiendo llegar a medir 60 m de altura (Jayawickrama, *et al.*, 1993). En el entorno acuático, abunda la “tatora” (*Typha domingensis*) una hierba perenne y acuática, con tallos erectos entre uno a tres metros de altura (figura 4.17 B) (Rodríguez *et al.*, 2020). Asimismo, se encuentra “pasto salado” (figura 4.17 C), corresponde a la especie herbácea perenne *Distichlis spicata*, que posee rizomas gruesos y ramificados, con escamas y punzantes, de 10-60 cm de altura (Marticorena *et al.*, 2004). También está ampliamente distribuida la especie *Pluchea absinthioides* conocida como la “Brea” (figura 4.17 D), esta no supera los 1.4 metros de altura y sus hojas son de color verde pálido (Griem, 2010). En los cauces tributarios, destacan la presencia de troncos y arbustos como el romero silvestre (*Rhododendron tomentosum*), que tiene ramas verticales que miden entre 30 y 120 cm y cuyas hojas se sitúan en las partes superiores (figura 4.17 E) (Mofikoya *et al.*, 2019) y algunos cactus, como el *Eulychnia acidas* una especie de arbustos pequeño muy ramificado con espinas radiales aciculares (figura 4.17 F) (Señoret y Acosta, 2013).



Figura 4.17. Fotografías de la vegetación presente en el área de estudio. Elaboración propia.

4.1.5 Actividad antrópica

En el área de estudio, la actividad antrópica se identificó en la pavimentación del suelo (C-416), en el uso de suelo y en las construcciones de las viviendas ubicadas en las uniones de las quebradas, como se detalla en el mapa de falso color para detección de zonas urbanas (anexo 12). En la quebrada Totoral, la pavimentación del suelo (C-416) impide la infiltración del agua. Además, durante las visitas a terreno, se observó que, en la quebrada del Loro, la ruta C-438 se encuentra en proceso de pavimentación, lo que provoca una acumulación de agua y un consecuente aumento en el cauce natural (figura 4.18 A). El uso de suelo es principalmente agrícola, destinado a plantaciones de árboles frutales como olivos, duraznos, damascos, perales, entre otros. En la quebrada Totoral, las plantaciones de olivos (figura 4.18 B) se extienden por más de un kilómetro, obstaculizando el flujo de agua. Finalmente, en la unión de la Quebrada Totoral y las Quebradas del Carbón y la Laguna, se pueden identificar construcciones de viviendas que interfieren con el flujo natural del agua (figura 4.18 C, D y E).



Figura 4.18. A) Pavimentación ruta C-416 B) plantaciones de olivos C), D) y E) Construcción de viviendas, las flechas rojas indican las quebradas. Elaboración propia.

4.2 Análisis de factores desencadenantes

4.2.1 Precipitaciones

Las precipitaciones del área de estudio son extremadamente variables, se presentan mayormente en los meses de junio, julio y agosto, aunque hay excepciones en los meses de primavera (Antonioletti *et al*, 1972).

La tabla 4.1, muestra el registro de las precipitaciones anuales máximas en 24 horas de la estación meteorológica Totoral, ubicada en las coordenadas N 6.912.196 y E 306.985 (a metros de la plaza de Totoral). La DGA cuenta con datos de precipitaciones desde 1991 hasta 2021, sin embargo, hay años en los que no se dispone de información. El 11 de julio de 2022, los registros de ONEMI Atacama indicaron una precipitación superior a 46 mm.

Tabla 4.1. Precipitaciones anuales máximas en 24 hrs (mm). Estación Totoral, DGA.
Elaboración propia

Año	Fecha	Precipitación máxima anual en 24 hrs (mm)
1991	16/06	48.00
1992	06/06	17.00
1996	06/07	7.40
1997	12/06	88.10
1998	09/06	3.80
2000	23/06	40.00
2001	16/08	7.00
2002	27/08	22.00
2004	20/07	21.00
2005	15/07	6.00
2008	20/07	23.00
2009	20/07	10.00
2010	15/05	18.00
2011	30/07	15.00
2013	17/05	9.00
2014	22/05	7.00
2015	12/07	22.00
2016	28/05	2.50
2017	10/05	28.00
2020	15/06	8.00
2021	23/06	7.60

4.3 Encuesta sobre el impacto de aluviones en Totoral y Perales

Los primeros registros de aluviones en Totoral corresponden al año 1997. Según Sociedad Contractual Minera El Morro (2008), la crecida aluvional se produjo por el aporte de las quebradas afluentes mayores de la quebrada Totoral, lo que incrementó significativamente el caudal. Sin embargo, según lo comentado por los habitantes de Totoral, en 1980 se registró una víctima fatal en el ingreso de Totoral (coordenadas UTM N 6.904.398 E341.361) por cortes en la carretera C-416 a causa de una crecida aluvional. En el año 2015, 2017 y 2022 la información relacionada con los flujos de detritos fue proporcionada a través de medios digitales, pero no en informes técnicos formales. Por ello, las localidades de Totoral y Perales cuentan con escasos registros escritos sobre los flujos de detritos que las han afectado. Esta falta de información histórica dificulta la comprensión completa de los riesgos que enfrenta la comunidad. Por esta razón, la información proporcionada por los miembros de la comunidad juega un rol fundamental. En este contexto, se llevó a cabo una encuesta (anexo 13) organizada en colaboración con la junta de vecinos de Totoral, con el objetivo de identificar el impacto de los aluviones y de proveer información y que permita a las instituciones tomar decisiones estratégicas informadas. Como parte de la encuesta realizada, se consideró la participación de los habitantes de las comunidades de Totoral y Perales. Según el último Censo realizado en Chile en el año 2017, estas localidades tenían un total de 159 habitantes; sin embargo, de acuerdo a lo observado en terreno y con la información proporcionada por la presidenta de la junta de vecinos, se estima que actualmente residen de forma permanente en las localidades aproximadamente 70 personas. La encuesta fue aplicada a la totalidad de estos residentes, quienes respondieron todas las preguntas, como se detalla en el anexo 14. La encuesta abordó aspectos como la experiencia en los aluviones, el impacto en las viviendas, las causas del daño, impacto en los huertos, aislamiento, identificación de quebradas y medidas preventivas posterior al aluvión. Es importante destacar que varias familias sólo se trasladan periódicamente para cuidar las propiedades de sus familiares, pero no habitan en el lugar de manera cotidiana.

Los resultados de la encuesta muestran que el 78.6 % de los encuestados se encontraban en Totoral y Perales durante el aluvión de 2015, mientras que el 21.4 % no estuvo presente (figura 4.19).

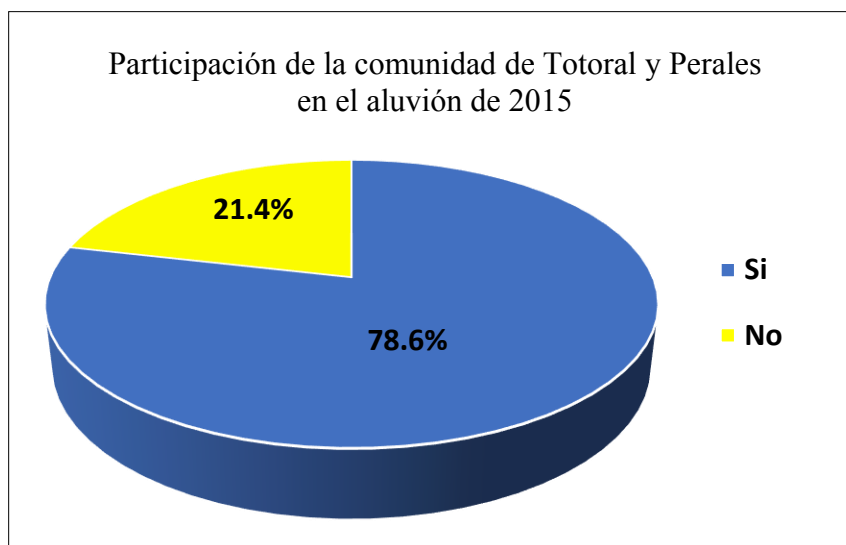


Figura 4.19. Gráfico de porcentajes de habitantes de Totoral y Perales durante el aluvión de 2015. Elaboración propia.

El 21.4% (anexo 14) de los habitantes de las localidades de Totoral y Perales sufrió daños en su vivienda, mientras que el 78.6% (no aplica) indicó que no experimentó ningún daño a su propiedad. En la figura 4.20, se detalla el tipo de daño provocado por el aluvión del año 2015.

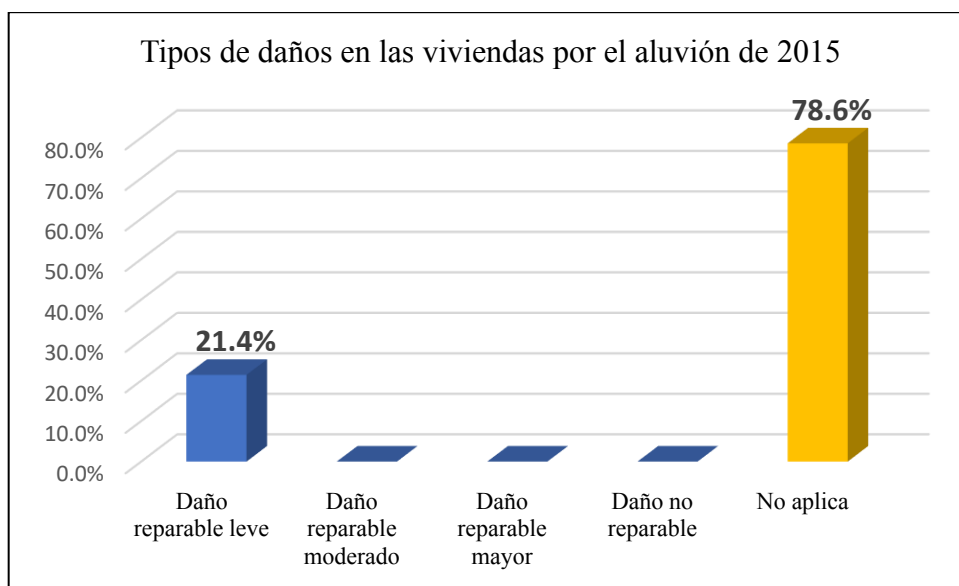


Figura 4.20. Gráfico de barras con las categorías de daño: leve, moderado, mayor y no reparable, Elaboración propia.

Como se detallan en la figura 4.21, las causas que provocaron el daño de las viviendas fue la activación de todas las quebradas principales (capítulo IV, sección 4.1.3), además, el 57.1% de los habitantes sufrieron daños a su huerto, mientras que el 42.9 % no fue afectado (anexo 14).

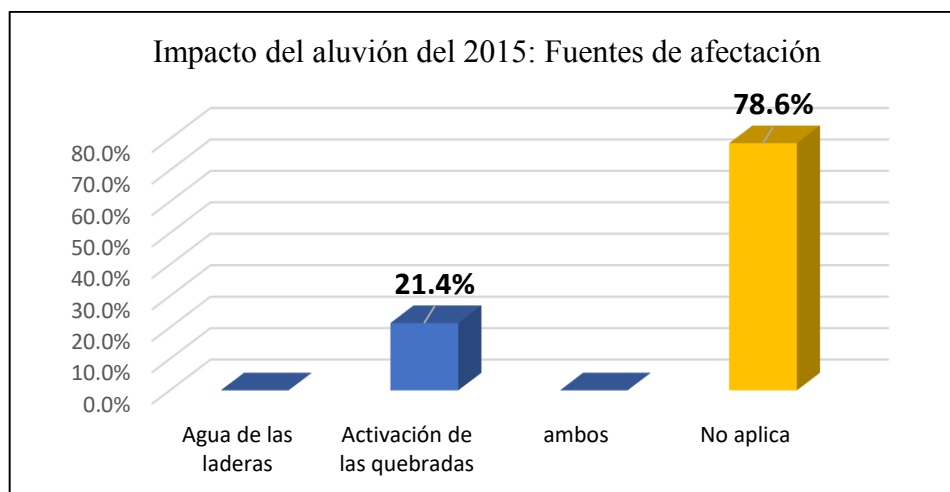


Figura 4.21. Gráfico de las fuentes de afectación del aluvión de 2015. Elaboración propia.

Tras el aluvión del 2015, el 78.6 % de los residentes quedaron aislados, mientras que el “no aplica” corresponde a aquellos que no se encontraban en Totoral y Perales (anexo 14). Los habitantes mencionaron que el aislamiento fue provocado por los cortes en las carreteras debido al flujo de detritos y/o barro, esta situación se prolongó entre uno y tres días como se observa en la figura 4.22, aunque el tiempo varió dependiendo de la ubicación de las viviendas.

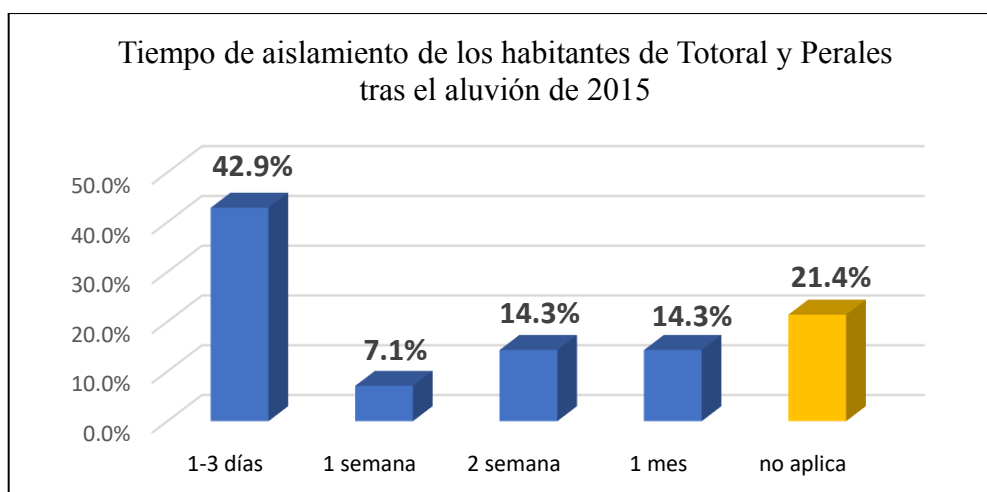


Figura 4.22. Gráfico de los días en que los habitantes quedaron aislados tras el aluvión de 2015. Elaboración propia.

Con base a lo anterior, se preguntó a los encuestados si estuvieron presentes durante el aluvión de 2017. Como se observa en la figura 4.23, el 85,7 % estuvo presente en Totoral y Perales, mientras que el 14,3 % no se encontraba en las localidades.

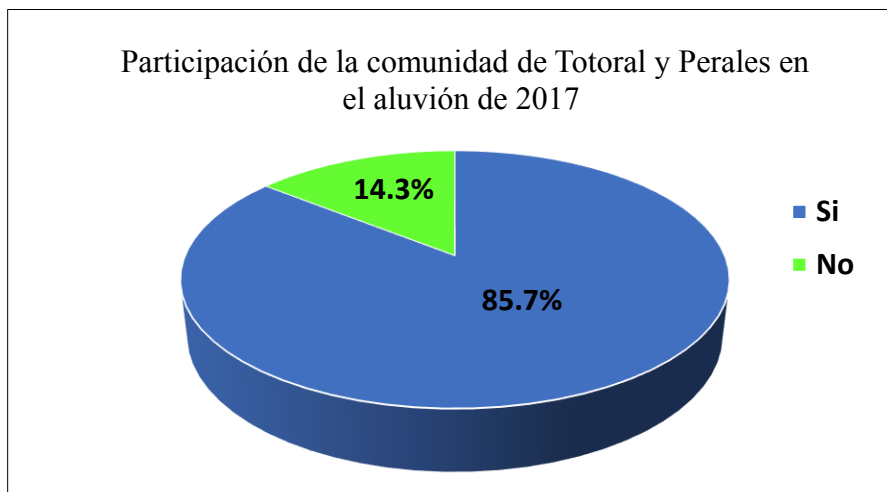


Figura 4.23. Gráfico de porcentajes de habitantes de Totoral y Perales durante el aluvión de 2017. Elaboración propia.

En el anexo 14, se muestra que, de los encuestados, el 35.7 % sufrió daño en su vivienda debido al aluvión de 2017, mientras que el 64.3 % no reportó afectaciones, considerando este último grupo como “no aplica”. En la figura 4.24, se detalla la severidad de los daños y enfatiza la resistencia de las estructuras habitacionales en la comunidad, destacando que el tipo de daño experimentado más común, fue el daño reparable leve.

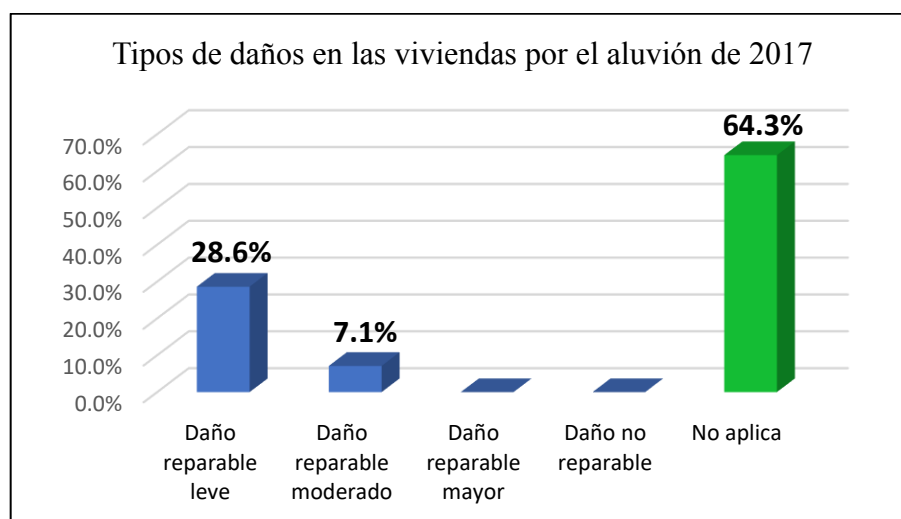


Figura 4.24. Gráfico de barras con las categorías de daño, leve, moderado, mayor y no reparable, Elaboración propia.

En la figura 4.25 se detalla las principales fuentes de afectación que causaron el daño a las viviendas en la comunidad. Se observa que la activación de las quebradas principales (35.7%) fue la causa predominante. Esta situación no sólo afectó a las viviendas, sino también tuvo un impacto significativo en la agricultura local, de hecho, el 64.3% de los habitantes sufrieron daños en su huerto, mientras que el 35.7 % no sufrió ningún tipo de daño (anexo 14).

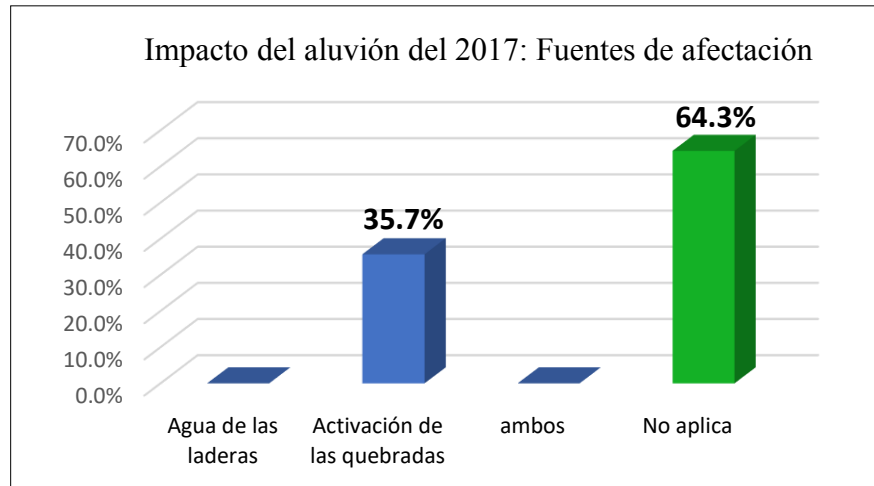


Figura 4.25. Gráfico de las fuentes de afectación del aluvión de 2017. Elaboración propia.

Las causas del daño a las viviendas fueron la activación de todas las quebradas principales (capítulo IV, sección 4.1.3). Esto fue evidenciado a través de registro fotográfico proporcionados por los habitantes de las localidades de Totoral y Perales, como se observa en la figura 4.26 y el anexo 15.



Figura 4.26. Fotografía de la quebrada Totoral en el aluvión de 2017. La línea roja muestra el límite del agua. Fuente: Modificada de Cristián Vitali.

Posterior al aluvión del 2017 el 85.7 % de los habitantes de Totoral y Perales quedaron aislados, mientras que el 14.3 % corresponde a aquellos que no. En la encuesta los habitantes mencionaron que a diferencia del año 2015 el tiempo de aislamiento provocado por los cortes en las carreteras por el flujo de detritos y/o barro fue menor, sin embargo, esta situación se prolongó entre uno y tres días como se observa en la figura 4.27.

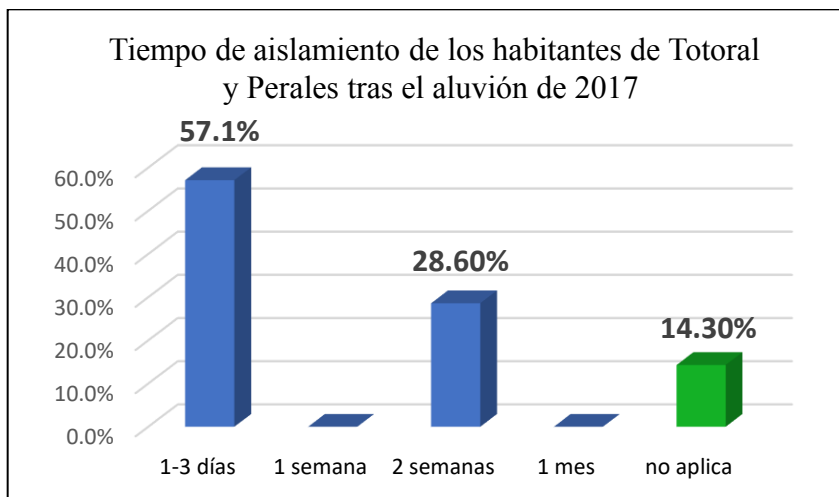


Figura 4.27. Gráfico de los días en que los habitantes quedaron aislados tras el aluvión de 2017. Elaboración propia.

En base a lo anterior, se preguntó a los encuestados si estuvieron presentes durante el aluvión de 2022. Como se detalla en la figura 4.28, el 92,9% estuvo presente en Totoral y Perales, mientras que el 7.1% no se encontraba en las localidades.

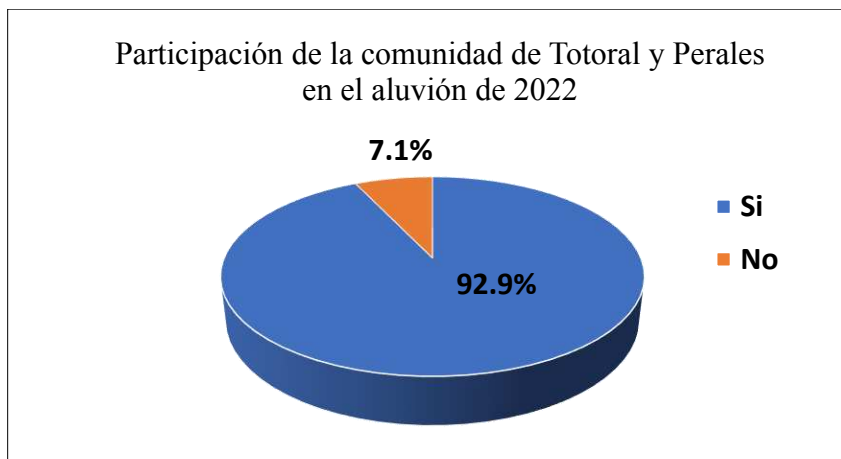


Figura 4.28. Gráfico de porcentajes de habitantes de Totoral y Perales durante el aluvión de 2022. Elaboración propia.

Del 92.9 % de los encuestados, el 21,4% reportó que su vivienda fue afectada por aluvión de 2022, mientras que el 78,6% de los habitantes no sufrió ningún daño, el cual se refleja como “no aplica”. En la figura 4.29, se detalla los daños a las viviendas, destacando que el tipo de daño más común fue el daño reparable leve.

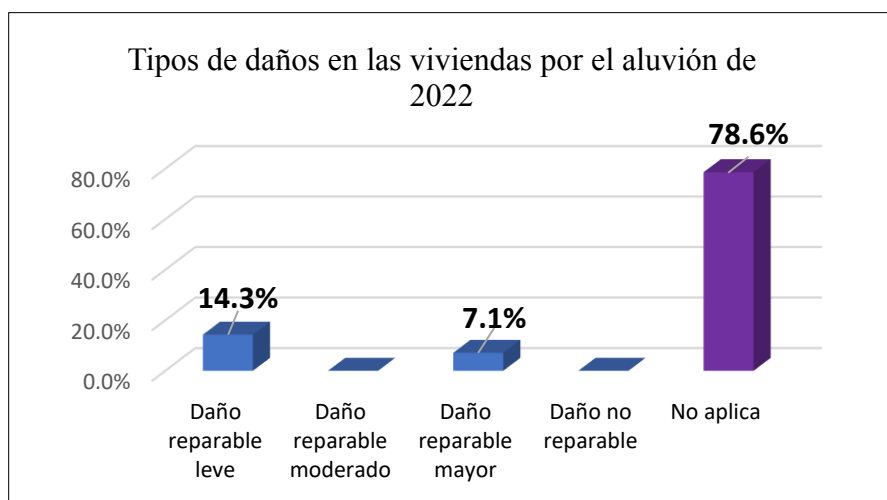


Figura 4.29. Gráfico de barras con las categorías de daño, leve, moderado, mayor y no reparable, Elaboración propia.

Las causas principales del daño a las viviendas se detallan en la figura 4.30, donde la activación de las quebradas es la causa más significativa, afectando al 14,3% de las viviendas. También, esta situación afectó al 57.1% de los huertos de los habitantes, mientras que el 42.9 % no fue afectado (anexo 14).

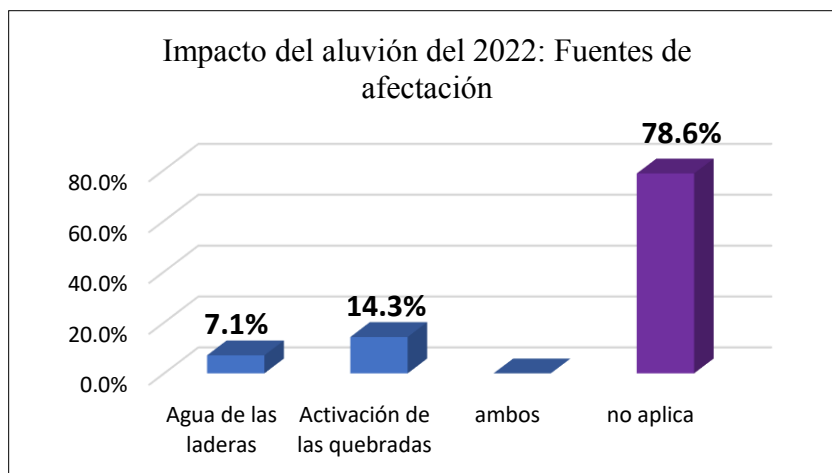


Figura 4.30. Gráfico de las fuentes de afectación del aluvión de 2022. Elaboración propia.

Como se observa en la figura 39, las causas del daño a las viviendas fueron la activación de todas las quebradas principales (figura 4.31) y quebradas menores como la conocida por los vecinos “quebrada el Panteón”, ubicada al oeste del cementerio de Ttotal. Los registros fotográficos del aluvión se pueden visualizar en el anexo 16.



Figura 4.31. Fotografía de la quebrada Ttotal en el aluvión de 2022. Fuente: Sara Vallejo.

Después del aluvión del 2022, el 92.9 % de los residentes quedaron aislados, mientras que el 7.1 % corresponde a los que no se encontraban en Ttotal y Perales (anexo 14). El tiempo aproximado de aislamiento fue entre uno y tres días (figura 4.32).

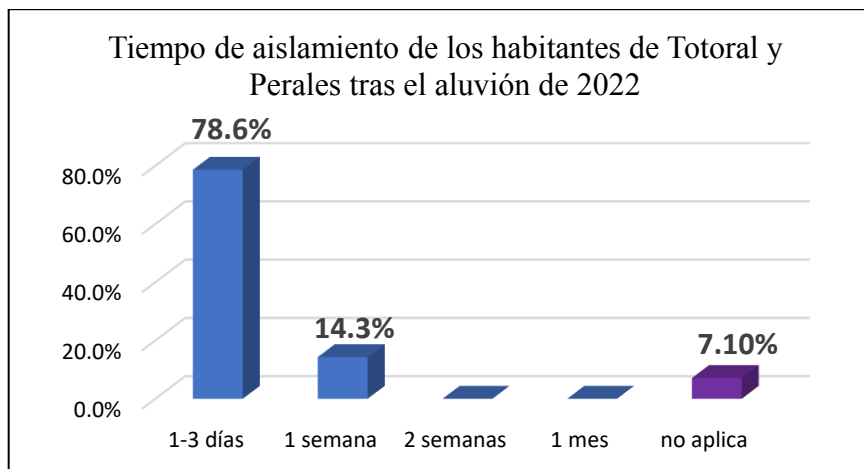


Figura 4.32. Gráfico de los días en que los habitantes quedaron aislados tras el aluvión de 2022. Elaboración propia.

4.4 Eventos de flujos de detritos y/o barro en Totoral y Perales

Durante las campañas de terreno se observó evidencias de llanuras de inundación aguas arriba de la quebrada Totoral, la altura de la llanura de inundación durante estos eventos alcanzó unos 6 metros aproximadamente. La potencia varía según la ubicación, en la confluencia de la quebrada Totoral con la quebrada la Laguna el límite del agua alcanzó cerca de 5 metros (figura 4.33 A). Por otro lado, en la quebrada La laguna (figura 4.33 B) la llanura de inundación tiene una potencia de 1 metro aproximadamente, mientras que en la quebrada El Carbón su altura es de alrededor de 30 centímetros (figura 4.33 C) donde se pueden observar troncos secos. En la quebrada del Loro, no se identificaron llanuras de inundación.



Figura 4.33. Con línea roja se observa el límite del agua en: A) la quebrada Totoral, B) quebrada La Laguna y C) quebrada El Carbón. Elaboración propia.

En los eventos de 1997 y 2015 no se cuenta con un registro estratigráfico de los flujos de detritos y/o barro que afectaron a las comunidades de Totoral y Perales. Sin embargo, para el año 2017, se observa, a través de imágenes satelitales de Google Earth el cambio geomorfológico (figura 4.34). Este cambio dio lugar a la formación de una terraza con una altura superior a dos metros, como se detalla en el anexo 17. En la figura 4.35, se observa el registro del aluvión en 2022, en la confluencia de la quebrada Totoral y la Laguna (anexo 16.1), este depósito presenta una composición homogénea, que corresponde a arenas gruesas con una potencia de 60 centímetros.

Imagen obtenida del día 7 de octubre del 2016 1:1.000

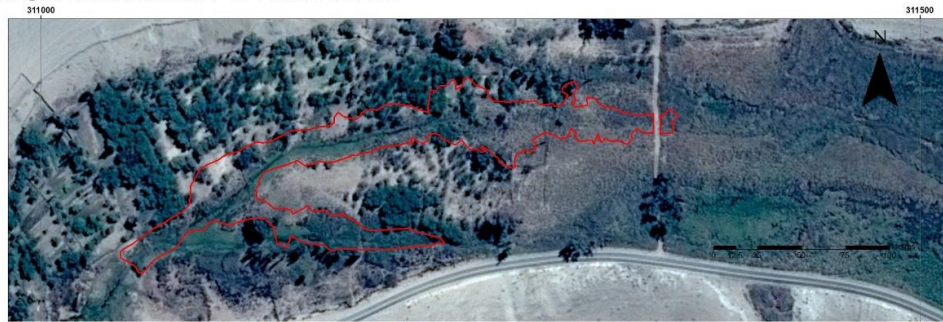


Imagen obtenida del día 28 de marzo del 2019 1:1.000



Figura 4.34. Cambio en la geomorfología de la quebrada Totoral posterior al aluvión de 2017. Elaboración propia



Figura 4.35. Registro del aluvión de 2022 en la unión de la quebrada Totoral y la Laguna. Elaboración propia.

4.5 Evaluación del índice de susceptibilidad de remociones en masa

4.5.1 Definición de unidades geomorfológicas

En el presente estudio, se busca definir unidades que reúnan características similares, considerando la geología, geotecnia y geomorfología de la zona. Los cambios bruscos de pendiente son factores para definir una nueva unidad. Este análisis incluye los mapas de las pendientes y exposición al sol según la orientación de las laderas (capítulo IV, sección 4.1.2) y excluye los afloramientos rocosos con condiciones de discontinuidades de regular a buena. La metodología de Lara (2007) sugiere que el sector de estudio no sea dividido en más de 150 unidades. Finalmente se obtienen 59 unidades geomorfológicas, como se observa en el mapa de unidades geomorfológicas (figura 4.36) y se detalla en el anexo 18. Cabe destacar que estas unidades pueden ser movilizadas durante eventos de precipitaciones intensas.

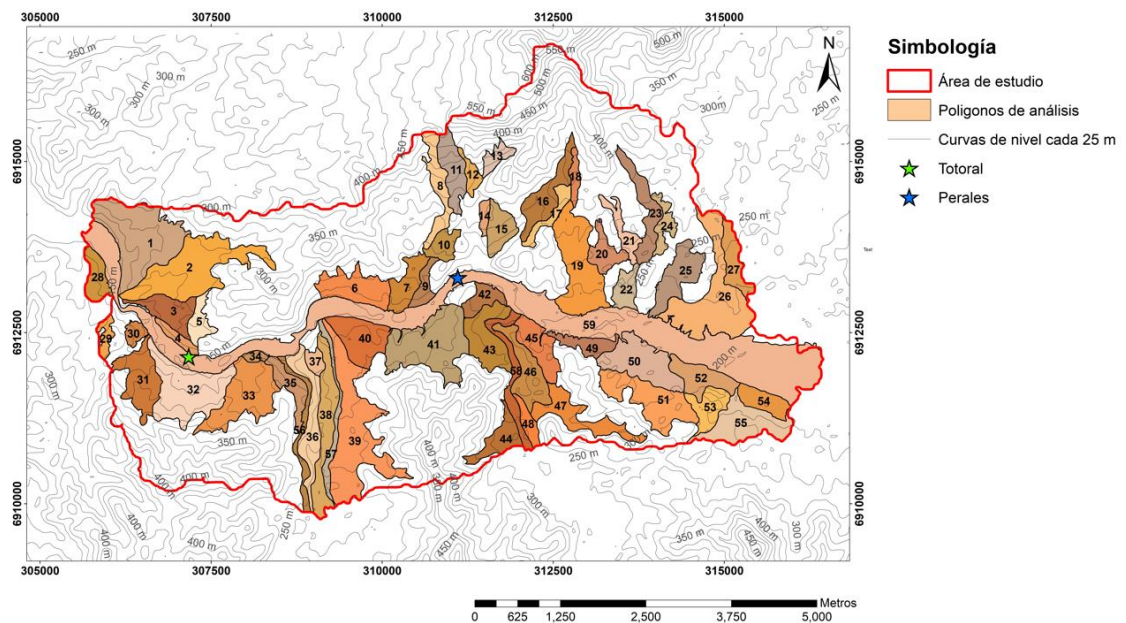


Figura 4.36. Mapa de unidades geomorfológicas. Elaboración propia.

4.5.2 Cálculo del índice de susceptibilidad

Para el factor geomorfología

F1. Pendiente de Ladera y F2. Pendiente canal de drenaje al pie de la ladera

Para las unidades que son sólo canal de drenaje, el puntaje F2 se asocia a F1, por lo que queda sólo un puntaje otorgado como “pendiente de canal” (F1). Cuyos resultados se presentan en tabla 4.2.

Tabla 4.2. Valores de las pendientes de cada polígono. Elaboración propia.

ID	pendiente (°)	ID	pendiente (°)	ID	pendiente (°)	ID	pendiente (°)
P1	9	P16	8.1	P31	8.4	P46	4.6
P2	6.5	P17	5.5	P32	10	P47	4.6
P3	6.8	P18	7.3	P33	7.6	P48	5.5
P4	13.3	P19	4.6	P34	14	P49	4.5
P5	5.3	P20	5	P35	12.7	P50	3.5
P6	8.5	P21	4.8	P36	11.3	P51	4.5
P7	7.7	P22	5.7	P37	4.8	P52	3.2
P8	8.4	P23	3.9	P38	7.2	P53	3.5
P9	8.8	P24	5	P39	5.1	P54	3
P10	5.9	P25	4.2	P40	6	P55	3.1
P11	9.3	P26	2.9	P41	6.9	P56	5.1
P12	13.6	P27	2.8	P42	5.8	P57	3.9
P13	13.6	P28	12	P43	6.5	P58	3
P14	8.2	P29	8.9	P44	5.6	P59	3.3
P15	8.5	P30	9.3	P45	4.9		

F3. Encajonamiento canal de drenaje

El encajonamiento se obtuvo mediante la relación profundidad/ancho del canal. A los polígonos que representan sólo ladera y quebradas, se asignó un valor de encajonamiento cero.

F4. Exposición al sol

Con el mapa de la exposición solar, el cual muestra la orientación de las laderas (figura 4.13) se asignaron los valores a cada polígono.

Factor geología-geotecnia

F5. Características geológicas-geotécnicas del material

Tabla 4.3. Ponderación del factor geología-geotecnia. Elaboración propia

Tipo de depósito	Ponderación
Gravas grises	Favorable (18%)
Gravas rojizas	Favorable (18%)
Depósitos aluviales antiguos	Medianamente favorable (13%)
Depósitos aluviales recientes	Muy favorable (25%)
Depósitos eólicos	Poco favorable (8%)

F6. Redes de transporte gravitacional de agua

Se identificaron los drenajes secundarios, que se caracterizan por tener un sistema de canales dendríticos y paralelos, muchos de los cuales están conectados con la quebrada Totoral y las quebradas secundarias. Además, en las evidencias de llanuras de inundación, esta última se identifica principalmente en la quebrada Totoral y sus afluentes, siendo una zona de acumulación de sedimentos finos.

Factor clima-vegetación

F7. Acumulación de nieve

En el área de estudio, no hay acumulación de nieve, ya que se encuentra en una zona transicional, lo que implica que las condiciones climáticas no favorecen la formación o retención de nieve. Por lo tanto, todos los polígonos se les han asignado un valor de cero.

F8. Cobertura vegetal

Se evaluaron las características de la vegetación, poniendo énfasis en la densidad de cada tipo de vegetación (*Eucalyptus globulus*, *Typha domingensi*, *Distichlis spicata*, *Pluchea absinthioides*, *Rhododendron tomentosum* y *Eulychnia acidas*). En este contexto, la vegetación se concentra principalmente en la quebrada Totoral y se distribuye en menor medida hacia sus alrededores.

Factor antrópico

F9. Obstrucción de canal de drenaje

Corresponde a las viviendas en la unión de la quebrada Totoral y el Carbón, además de la quebrada Totoral y la Laguna. También incluye las plantaciones en la quebrada Totoral y la pavimentación de las carreteras C-416 y C-438 que no permiten la filtración de agua.

F10. Desestabilización artificial de laderas

No se observó cortes artificiales en laderas, construcción de terraplenes, entre otros por lo que se le asignó un valor de cero.

Antecedentes

F11. Aluviones declarados en la hoya hidrográfica

El área de estudio presenta muy poca información escrita; por lo tanto, los valores son asignados en base a la información de los medios digitales, las observaciones realizadas en terreno y a lo informado por los habitantes de Totoral y Perales.

Índice de susceptibilidad (IS)

El valor de índice de susceptibilidad es la sumatoria de todos los factores condicionantes para cada polígono de estudio, como se detalla en la tabla 4.4. El valor se clasifica en tres categorías distintas, bajo $IS < 25\%$, medio $25\% \leq IS < 50\%$ y alto $IS \geq 50\%$.

Tabla 4.4. Ponderación de factores condicionantes y el índice de susceptibilidad (IS) de flujos de detritos asociado a cada polígono. Elaboración propia.

ID	f1(%)	f3 (%)	f4 (%)	f5 (%)	f6 (%)	f7 (%)	f8 (%)	f9 (%)	f10 (%)	f11 (%)	IS (%)
1	15	1	2	18	7	0	5	0	0	0	48
2	15	1	2	18	7	0	5	0	0	0	48
3	15	1	2	18	10	0	5	0	0	0	51
4	20	0	2	18	7	0	5	0	0	0	52
5	15	1	2	18	10	0	5	0	0	0	51
6	15	1	1	18	7	0	5	0	0	0	47
7	15	1	1	18	7	0	5	0	0	0	47
8	15	7	1	8	3	0	5	0	0	0	39
9	15	1	2	18	3	0	5	0	0	0	44
10	15	1	1	8	3	0	5	0	0	0	33
11	15	4	1	8	2	0	5	0	0	0	35
12	20	0	2	8	2	0	5	0	0	0	37
13	20	0	1	8	3	0	5	0	0	0	37
14	15	0	2	8	2	0	5	0	0	0	32
15	15	0	1	8	2	0	5	0	0	0	31
16	15	1	2	8	3	0	5	0	0	0	34
17	15	0	1	8	3	0	5	0	0	0	32
18	15	0	2	8	2	0	5	0	0	0	32
19	5	1	1	13	10	0	5	0	0	0	35

20	5	1	1	13	3	0	5	0	0	0	28
21	5	1	2	13	3	0	5	0	0	0	29
22	15	1	2	13	3	0	5	0	0	0	39
23	5	4	2	13	3	0	5	0	0	0	32
24	15	1	2	8	3	0	5	0	0	0	34
25	5	1	2	13	3	0	5	0	0	0	29
26	5	1	1	13	3	0	5	0	0	0	28
27	5	1	1	18	3	0	5	0	0	0	33
28	20	1	2	18	3	0	5	0	0	0	49
29	15	1	2	18	3	0	5	0	0	0	44
30	15	0	2	18	2	0	5	0	0	0	42
31	15	1	2	18	3	0	5	0	0	0	44
32	15	1	2	18	10	0	5	0	0	0	51
33	15	1	2	18	10	0	5	0	0	0	51
34	20	0	3	18	3	0	5	0	0	0	49
35	20	0	2	18	3	0	5	0	0	0	48
36	20	0	2	18	3	0	5	0	0	0	48
37	5	1	2	18	7	0	5	0	0	0	38
38	15	0	2	18	3	0	5	0	0	0	43
39	15	1	2	18	7	0	5	0	0	0	48
40	15	1	2	18	7	0	5	0	0	0	48
41	15	1	2	18	10	0	5	0	0	0	51
42	15	1	2	18	3	0	5	0	0	0	44
43	15	1	2	18	3	0	5	0	0	0	44
44	15	1	2	18	3	0	5	0	0	0	44
45	5	1	2	18	3	0	5	0	0	0	34
46	5	1	2	18	3	0	5	0	0	0	34
47	5	1	2	18	3	0	5	0	0	0	34
48	15	0	2	18	2	0	5	0	0	0	42
49	5	1	2	18	3	0	5	0	0	0	34
50	5	1	2	18	3	0	5	0	0	0	34
51	5	1	2	18	3	0	5	0	0	0	34
52	5	1	2	18	3	0	5	0	0	0	34
53	5	1	2	18	3	0	5	0	0	0	34
54	5	1	2	18	3	0	5	0	0	0	34
55	5	1	2	13	3	0	5	0	0	0	29
56	15	0	2	25	10	0	5	5	0	10	72
57	5	0	2	25	10	0	5	5	0	10	62
58	5	0	2	25	10	0	5	0	0	10	57
59	5	0	2	25	10	0	3	5	0	10	60

4.5.4 Mapa de índice susceptibilidad de flujos de detritos y/o barro

En la figura 4.37, se presenta el mapa de índice de susceptibilidad de flujos de detritos y/o barro, el cual se detalla en el anexo 19. La leyenda muestra el índice de susceptibilidad dividido en tres categorías:

- El color verde indica un índice de susceptibilidad bajo.
- El color amarillo indica un índice de susceptibilidad medio.
- El color rojo indica un índice de susceptibilidad alto.

En el área de estudio, no se identifican zonas de susceptibilidad baja ($IS < 25$). Predomina un Índice de Susceptibilidad medio ($25 \leq IS < 50$), en las que se encuentran las zonas de mayor pendiente, alcanzando los 13° . Las áreas más susceptibles ($IS \geq 50$) se encuentran en la quebrada Totoral, la cual, a pesar de no tener una pendiente pronunciada recibe el aporte de la quebrada Boquerón que desciende desde el sureste, así como sus afluentes la quebrada el Carbón, quebrada la Laguna y quebrada del Loro. Además, se incluyen los sectores noroeste y sur de Totoral y el suroeste de Perales. Las áreas que se observan sin color corresponden a los macizos rocosos con condiciones de discontinuidades de regular a buena.

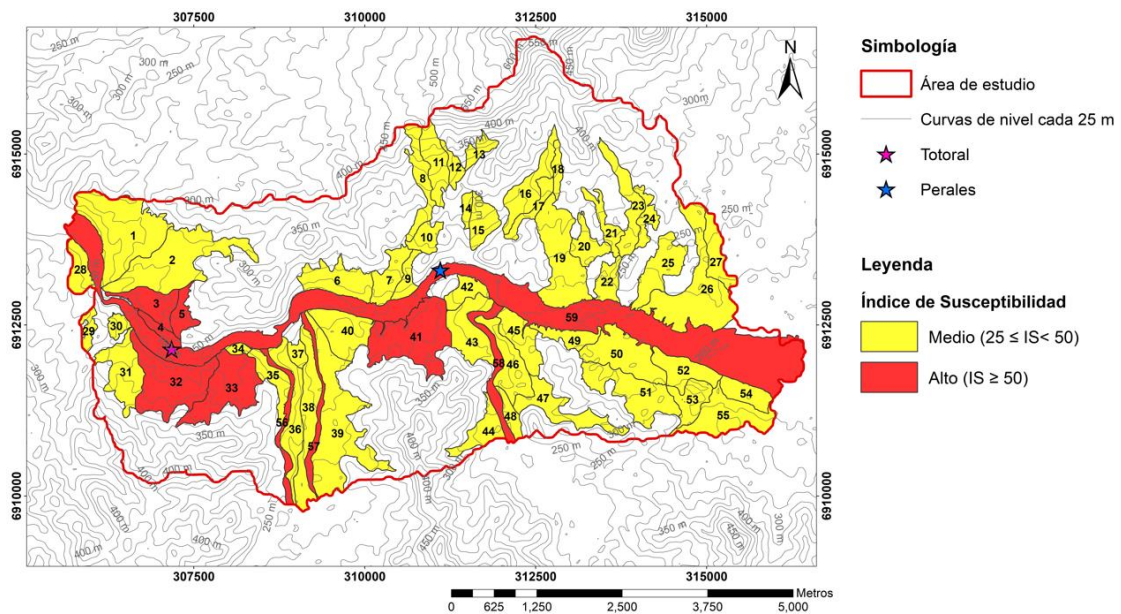


Figura 4.37. Mapa de Índice de Susceptibilidad de flujos de detritos y/o barro. Elaboración propia.

CAPÍTULO V: DISCUSIONES

5.1 Metodología

La metodología de Lara (2007) permite evaluar los factores condicionantes como la geología, geotecnia, geomorfología, vegetación, clima, causas antrópicas y antecedentes históricos asignándole un valor de susceptibilidad frente a eventos de remoción en masa de tipo flujos de detritos. En el anexo 1, de la presente investigación, se detalla las modificaciones de algunos factores debido a las observaciones en terreno y factores que requieren más investigaciones.

En relación con el factor pendiente de ladera (f_1) se modificaron los valores para el promedio de las pendientes, aplicando la metodología de Muñoz (2013), ya que se ajusta mejor a las características específicas del área de estudio. Esta consideración es clave, ya que en el caso de la quebrada Totoral se extiende de E a W con una longitud aproximada de 37 km y una pendiente promedio de $0,3^\circ$ (Sociedad Contractual Minera El Morro, 2008), su baja inclinación junto con su red de tipo dendrítica, exorreica y torrencial, influyen en la acumulación y desplazamiento de sedimentos, sumado a las características de sus afluentes que alcanzan longitudes superiores a 15 km.

Lara (2007) menciona que el factor de encajonamiento del canal de drenaje (f_3) puede considerarse un valor mayor a 0.7 como un encajonamiento alto. Sin embargo, la referencia no especifica un valor concreto para categorizar el encajonamiento medio o bajo, lo que puede generar cierta ambigüedad al intentar clasificar los rangos. Por lo tanto, para este estudio se han propuesto rangos para permitir una clasificación baja, media y alta más precisa. Este enfoque busca llenar el vacío por falta de criterios claros para los valores bajo, estableciendo rangos más definidos.

El factor de características geológicas y geotécnicas (f_5) para roca, aunque se realizó un análisis de la geología y geotecnia de la zona de estudio, no fue incluido en este análisis, siguiendo la metodología de Lecaros (2021). Para suelo, las propiedades geotécnicas que se consideran corresponden a la clasificación USCS, plasticidad, permeabilidad y humedad. La metodología también incluye la densidad, que se obtiene con el método cono de arena, el cual permite determinar la densidad natural del suelo en terreno. Este método consiste en excavar un agujero, pesar el suelo extraído para determinar su peso seco y su contenido de humedad, y luego llenar el agujero y el cono

del aparato con arena de densidad conocida. A partir de la cantidad de arena utilizada, se calcula el volumen del hueco, lo que permite determinar la densidad húmeda del suelo y, considerando la humedad, calcular su densidad seca. Sin embargo, este parámetro no fue incluido, ya que no se dispone del instrumento necesario para realizar el ensayo.

En cuanto al factor de condición de humedad y saturación en la ladera (f6), Lara (2007) considera la capacidad de saturación por debajo (profundidad nivel freático: si es menor a dos metros, se considera muy favorable para generación de flujos, si es mayor a dos metros, se considera poco favorable; y si se encuentra alrededor de tres metros, es considerado favorable. Además, se toma en cuenta la infiltración del agua por precipitación, capacidad de almacenaje de agua en la estructura de suelo y variaciones estacionales de humedad. En el presente trabajo fue reemplazado por “redes de transporte gravitacional de agua”, que considera los drenajes secundarios y evidencias de llanuras de inundación en el área de estudio. Esta modificación se realizó debido a que, para obtener el nivel freático en el área se requiere realizar pozos en diferentes puntos en el sector, lo cual no se contempló para este análisis. Al enfocarse en las redes de drenaje, se busca identificar áreas que podrían estar influenciadas por movimientos de agua a través de sistemas naturales de drenaje,

El factor correspondiente a tipo de material (f12) no se incluyó en el cálculo del IS, tanto para la roca como para el suelo, este último debido a que no se consideraron todos los parámetros necesarios para el análisis.

Para la división de los polígonos, la metodología de Lara (2007) divide el área completa para la evaluación de los factores condicionantes. Sin embargo, para esta investigación se aplicó la metodología de Lecaros (2021), que se evalúa los factores condicionantes únicamente en las subunidades donde se constató material disponible para ser removido durante eventos de precipitaciones intensas, descartando los afloramientos rocosos con

En relación a los polígonos finales, cada factor puede cambiar dependiendo del criterio de la persona. Por ejemplo, el factor de la cobertura vegetal (f8) aunque se realiza un análisis del tipo de vegetación, se basa principalmente en la densidad, la cual depende de la interpretación criterio de la persona que realice el análisis de cada polígono.

5.2 Resultados

Con los registros de precipitaciones correspondientes a los años 2015, 2017 y 2022, se determinó que las precipitaciones intensas son el principal factor desencadenante para la generación de flujos de detritos y/o barro. Los habitantes de Totoral y Perales mencionaron que la quebrada Totoral experimentó un crecimiento notable en el año 1997, coincidiendo con la más alta precipitación registrada hasta la fecha, alcanzó los 88.1 mm/h. Sin embargo, no hay registros estratigráficos de los flujos de detritos y/o barro en el área de estudio. Además, los habitantes de las comunidades indicaron que en el año 2022 las lluvias fueron más intensas en la zona, lo que provocó la activación de quebradas menores como la conocida “quebrada el Panteón”, al oeste del cementerio de Totoral, la cual no se había activado en eventos anteriores. No obstante, no se fue posible proponer un umbral crítico debido a la escasa información. En algunos años, como por ejemplo el 2022, no se cuenta con los datos exactos, lo que es fundamental para establecer las condiciones bajo las cuales podrían ocurrir la generación de flujos de detritos y/o barro.

Los datos entregados a través de la encuesta proporcionan información sobre la participación de las comunidades durante los aluviones, los tipos de daños en las viviendas, las fuentes de afectación y el tiempo de aislamiento que se complementa con la información geológica y geomorfológica obtenida en terreno. Esta combinación muestra que los efectos de las crecidas de las quebradas y la altura de las llanuras de inundación coinciden con la percepción de los residentes. Por el contrario, entre sus limitaciones se encuentra el sesgo del recuerdo; es decir, que algunas preguntas dependen de la memoria de los encuestados, lo que puede llevar a respuestas inexactas o incompletas. Es por esta razón, que no se incluyó el evento de 1997, ya que, al momento de realizar la encuesta, habían pasado 27 años y era posible que algunos detalles estuvieran influenciados por las limitaciones naturales de la memoria humana.

Los habitantes de Totoral y Perales mencionaron que posterior a los aluviones, ya no se implementaron medidas preventivas para mitigar los daños. Según sus testimonios, la atención se centró únicamente en proporcionar suministros básicos y apoyo para la recuperación, como por ejemplo alimentos, agua potable y ayuda temporal para reparar las viviendas dañadas (anexo 14). Además, destacaron que no se llevaron a cabo planificaciones a largo plazo que pudieran reducir el impacto de futuros eventos.

En el mapa de Índice de Susceptibilidad de flujos de detritos y/o barro, se observa que las áreas con mayor susceptibilidad corresponden a los depósitos aluviales recientes, principalmente en la quebrada Totoral y sus afluentes, además del sector noroeste y sur de Totoral, así como en el sector suroeste de Perales, que corresponde a las Gravas de Totoral. En relación a zonas de susceptibilidad media, estas incluyen las Gravas de Totoral, los depósitos aluviales antiguos y depósitos eólicos.

En relación con la evaluación del Índice de Susceptibilidad de deslizamiento en roca, no se observaron evidencias de deslizamiento de rocas por lo que no se llevó a cabo el cálculo del índice de susceptibilidad con su correspondiente mapa. Del mismo modo, no se realizó el cálculo de desprendimiento o caída de rocas, ya que la zona no presenta altas pendientes y en los sectores que podría producirse como la carretera C-416, ya que las condiciones de discontinuidades son de regulares a buenas, lo que no favorece la ocurrencia de este tipo de remociones.

5.3 Recomendaciones

Para las diferentes categorías de susceptibilidad, se recomiendan las siguientes medidas de mitigación:

Para las zonas con un índice de susceptibilidad **alta**, se recomienda:

- ✓ Prohibir construcciones de nuevas viviendas en zonas de alto riesgo.
- ✓ En la quebrada Totoral, instalar barreras flexibles para disminuir el flujo de energía.
- ✓ Capacitar e informar a la comunidad sobre los riesgos de los flujos de detritos y/o barro.
- ✓ Mantener un contacto con las autoridades para la adecuada limpieza de la vegetación seca en la quebrada Totoral.
- ✓ Desarrollar planes de emergencia y realizar simulacros periódicos para que la población sepa cómo actuar en caso de evacuación, además es importante que las rutas de evacuación hacia los puntos de encuentro sean accesibles, estén bien señalizadas y sean las establecidas por el Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SENAPRED) como se detalla en la figura 5.1.


NOMBRE SEÑAL	SEÑAL
ÁREA DE EVACUACIÓN	
VÍA DE EVACUACIÓN HACIA UN PUNTO DE ENCUENTRO	 <p data-bbox="777 1566 1062 1587">La señal debe indicar la distancia a recorrer.</p>
PUNTO DE ENCUENTRO	

Figura 5.1. Señales por remociones en masa del tipo aluvión. Extraída de SENAPRED (2024).

Para las zonas con un índice de susceptibilidad **media**, se recomienda:

- ✓ Realizar mantenciones periódicas en las viviendas, esto incluye revisión de los sistemas de drenaje, vegetación y escombros que obstaculicen el área.
- ✓ Establecer un canal de comunicación efectivo entre los vecinos de Totoral y Perales con las autoridades locales, especialmente en períodos de condiciones climáticas adversas que puedan propiciar lluvias intensas.
- ✓ Asegurar sistemas de drenajes efectivos para evitar la saturación de los suelos.
- ✓ Mantener informada a la población de Totoral y Perales sobre el riesgo potencial al que se encuentran expuestos y desarrollar campañas de concientización para que comprendan cómo actuar en caso de emergencia.

Para las zonas con un índice de susceptibilidad **baja**, se recomienda:

Aunque el mapa de índice de susceptibilidad no muestra áreas de baja susceptibilidad, se recomienda revisiones cada 6 meses. Esto es necesario porque los factores condicionantes pueden cambiar en el transcurso del tiempo.

Chile carece de una red de alerta temprana o de monitoreo para aluviones, a diferencia de los volcanes o la Red Sismológica Nacional, por lo que cada investigación sobre remociones en masa es un avance significativo, ya que permiten establecer las recurrencias e intensidades de estos eventos. En esta investigación se llevó a cabo la primera parte de la metodología propuesta por Lara. Por lo que sería un aporte para la comunidad de Totoral y Perales complementar esta información con la segunda etapa, así como un mapa de peligro de flujos de detritos. Estas medidas son fundamentales para proteger a la población y sus bienes, especialmente considerando que los habitantes han quedado aislados por la destrucción de la carretera producto de flujos de detritos y/o barro, la cual tardó aproximadamente un año y medio en ser reconstruida.

Otras recomendaciones es realizar modelaciones con programas de simulación de remociones de tipo flujos de detritos y/o barro, con el fin de evaluar si es posible implementar medidas de mitigación efectivas que no alteren el flujo natural de la quebrada Totoral y que sean capaces de contener el impacto de estos eventos. También implementar una estación de monitoreo (con datos pluviométricos y meteorológicos) en el área más alta de la cuenca quebrada Totoral y Costeras hasta quebrada Carrizal.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

1. Las localidades de Totoral y Perales han presentado eventos de remoción en masa, provocado por precipitaciones intensas en los años 2015, 2017 y 2022. Estos eventos, han generado la destrucción de viviendas, daños a los huertos y el aislamiento de las comunidades debido al corte de las carreteras.
2. En base a la metodología de Lara (2007) se identificaron las características geológicas y geotécnicas, geomorfológicas, hidrológicas, clima y vegetación y la actividad antrópica, lo que permitió evaluar como estos factores condicionantes interactúan para determinar los niveles de susceptibilidad en el área de estudio. Identificar estas características es esencial para comprender las condiciones que predisponen al terreno a la ocurrencia de estos eventos y para delimitar las zonas con mayor riesgo. El análisis de estas características permite correlacionar los eventos históricos de aluviones con las condiciones locales del terreno.
3. Las precipitaciones son el factor desencadenante de las remociones en masa de tipo flujo de detritos, sin embargo, no fue posible determinar un umbral crítico de precipitaciones debido a la escasa información.
4. De los factores condicionantes analizados, el factor condicionante más crítico corresponde a la geología, específicamente a las litologías presentes, como las gravas rojizas y grises, los depósitos aluviales recientes y antiguos, y depósitos eólicos. Las variaciones en la cohesión y permeabilidad condicionan la susceptibilidad del área a flujos de detritos y las acumulaciones de sedimentos en las quebradas. En particular, los depósitos aluviales recientes y eólicos, al estar poco consolidados representan unidades claves para la generación de estos eventos.
5. El área de estudio no presenta altas pendientes, y el aporte de sedimentos en una crecida aluvional en la quebrada Totoral proviene principalmente de las quebradas El Carbón, La Laguna y Del Loro. Estas quebradas ubicadas en el sector sur con una distancia promedio de más de 15 Km, son las que contribuyen significativamente con el transporte y depósito de sedimentos en la Quebrada

Total. Además, aunque la quebrada del Central y la quebrada Boquerón se encuentran más alejada del área también contribuyen en el aporte de sedimentos.

6. Los resultados de las encuestas son fundamentales para entender el impacto de los aluviones de los años 2015, 2017 y 2022 en Total y Perales. Gracias a estas encuestas, fue posible identificar las causas principales del daño a las viviendas. La causa más significativa fue la activación de las quebradas principales debido a las precipitaciones, especialmente en los aluviones de 2015 y 2017. Para el aluvión de 2022, además de la activación las quebradas principales, se activaron quebradas menores, como la “quebrada el panteón”. Dejando aislados a los habitantes entre uno a tres días disminuyendo cada vez más el tiempo de aislamiento desde el aluvión de 2015 al de 2022.
7. Para la evaluación de susceptibilidad se definieron 59 unidades geomorfológicas con características geológicas y geomorfológicas similares, como las pendientes de las laderas, su orientación, el tipo de material y los depósitos que las constituyen, calculándose para cada una de ellas un Índice de Susceptibilidad (IS). Este índice sólo se calculó para flujos de detritos y/o barro, ya que para deslizamiento en roca y desprendimiento o caídas de rocas en la vertiente sur poniente de la quebrada Ttotal no se observó evidencias de deslizamiento ni de caídas de rocas.
8. En el Mapa de Índice de Susceptibilidad de flujos de detritos y/o barro, las áreas con alta susceptibilidad corresponden a la quebrada Ttotal y sus afluentes, además del sector noroeste y sur de Ttotal y suroeste de Perales, correspondientes a los depósitos aluviales recientes y las gravas de Ttotal. Además, se observa un dominio en gran parte del área de estudio de una susceptibilidad media, que corresponde a los depósitos aluviales antiguos y depósitos eólicos. En el área no se observan zonas con susceptibilidad baja, sin embargo, hay que tener en cuenta que esto puede cambiar con el transcurso del tiempo dependiendo de la modificación de los factores condicionantes.

CAPÍTULO VII: REFERENCIAS

- Aguilar, G., Riquelme, R., Martinod, J. y Darrozes, J. (2013) *Rol del clima y la tectónica en la evolución geomorfológica de los Andes Semiáridos chilenos entre los 27-32°S*. *Andean Geology* 40 (1): 79-101 p.
- Aleotti, P. (2004). *A warning system for rainfall-induced shallow failures*. *Engineering Geology* No. 73. Elsevier, 247-265 p.
- Álvarez, S. (2018) *Dirección General de Aguas: Evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos subterráneos en los sectores acuíferos de la quebrada Totoral*. Informe Técnico Darh N°378, Departamento de Administración de Recursos hídricos Morandé 59, Gobierno de Chile, Santiago. 6 p.
- Angermann, D., J. Klotz, & C. Reigber. (1999) *Space-geodetic estimation of the Nazca-South America Euler vector*, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 171, 329-334 p.
- Antonioletti, R., Schneider, H., Borcosque, JL. y Zarate, E. (1972) *Características climáticas del Norte Chico (26° a 33° latitud sur)* Instituto de Investigación de Recursos Naturales, Santiago, 102 p.
- Baez, F. (2020) *Evaluación y zonificación del peligro de remociones en masa en ruta G-25 camino al volcán, San José de Maipo, región Metropolitana*. Memoria para optar al título de geólogo, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 142 p.
- Bahlburg, H., Breikreutz, C. y Zeil, W. (1986) *Paläozoische Sedimente Nordchiles*. *Berliner Geowissenschaftliche Abhandlungen, Reihe A, Band 66*, 147-168 p.
- Blanco, N., Godoy, E. y Marquardt, C. (2003) *Cartas Castilla y Totoral Bajo, región de Atacama*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, Nos. 77 y 78, 39 p., 1 mapa escala 1:100.000.
- Brabb, EE. (1984) *Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping*. In *Proceeding of the IVth ISL, Toronto*, vol 1, 307-324 p.
- Becerra, F. (2022) *Susceptibilidad a la remoción en masa y factores condicionantes en el borde costero de Concón y Viña del mar, región de Valparaíso, Chile*. Memoria

para optar al título de geóloga, Universidad Andrés Bello, Viña del mar, Chile, 58 p.

- Bell, M. (1984) *Deformation produced by the subduction of a Paleozoic turbidite sequence in northern Chile*. Journal of the Geological Society of London, Vol. 141, p. 339-347.
- Bell, M. (1987) *The origin of the Upper Paleozoic Chañaral mélange of N Chile*. Journal of the Geological Society. 144(4): 599-610 p.
- Bertoni, J.O. y Lombardi Neto, F., (1985) *Conservacao do solo*. Livroceres, Piracicaba, 368 p.
- Bissig, T. y Riquelme, R. (2009) *Contrasting Landscape Evolution and Development of Supergene Enrichment in the El Salvador Porphyry Cu and Potrerillos-El Hueso Cu-Au Districts, Northern Chile*. In Super-gene Environments, Processes and Products (Titley S.; editor). Society of Economic Geologists Special Publication 14: 59-68 p.
- Bissig, T. y Riquelme, R. (2010) *Andean uplift and climate evolution in the southern Atacama Desert deduced from geomorphology and supergene alunite-group minerals*. Earth and Planetary Science Letters 299: 447-457 p.
- Börgel, R. (1983) *Mapa geomorfológico de Chile, descripción geomorfológica del territorio*. Universidad de Chile, Instituto de Geografía, Santiago, Chile, 107 p.
- Brown, M.; Diaz, F. y Grocott, J. (1993) *Displacement history of the Atacama fault system 25° 00' S-27° 00' S, northern Chile*. Geological Society of America Bulletin, Vol. 105: 1165- 1174 p.
- Campos, F. (2014) *Evaluación de la susceptibilidad de remociones en masa en la Quebrada de los chanchos, región Metropolitana, Chile*. Memoria para optar al título de Geóloga. Universidad de Chile, Santiago de Chile, 99 p.

- Carrizo, D., y González, G. (2003) *Modelo de crecimiento de la Falla Salar del Carmen, Sistema de Fallas de Atacama, Cordillera de la Costa, norte de Chile*. En Congreso Geológico Chileno, No. 10, Concepción, Chile, 578-582 p.
- Charrier, R., Pinto, L. y Rodríguez, M.P. (2007) *Tectonostratigraphic evolution of the Andean orogen in Chile*. En: Moreno, T., Gibbons, W. (Eds.), *The Geology of Chile*. Geological Society, London, 21- 14 p.
- Cruden, D.M. (1991) *A simple definition of a landslide*. Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, 43(1), 27-29 p.
- Cruden, D. y Varnes, D. (1996) *Landslide types and processes*. In Turner A.K. y Schuster R.L., 1996. *Landslides: Investigation and Mitigation*. Special Report 247. Transportation Research Board, National Research Council. National Academy Press, Washington D.C. 675 p.
- Errázuriz, A.M., González, J.I., Henríquez, M., Cereceda P., González M. y Rioseco, R. (1998) *Manual de Geografía de Chile*. 3a Edición actualizada. Editorial Andrés Bello, Santiago. 443 p.
- Fernández, J. y Espinoza, L. (2020) *Compilación y análisis del registro histórico de remociones en masa tipo flujo en la cuenca del río Copiapó, región de Atacama*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-20-83: 81 p.
- Fernández, J. y Espinoza, L. (2022) *Susceptibilidad de remociones en masa en la cuenca del río Copiapó, región de Atacama*. SERNAGEOMIN, 108 p.: (Informe Registrado: n.22-99).
- Fuenzalida, P. (1950) *Clima: En: Geografía Económica de Chile*: CORFO, Editorial Universitaria, Tomo I, Santiago 188-254 p.
- García, F. (1967) *Geología del Norte Grande de Chile*. Sociedad Geológica de Chile. In Symposium sobre el geosinclinal Andino: Santiago. 138 p.

- Garrido, X. (1987) *Riesgos naturales en el sector Santiago oriente, región Metropolitana*. Informe inédito. Servicio Universitario Mundial (W.U.S.), 43 p.
- Galloway, WE. y Hobday, D.K (1983) *Terrigenous clastic depositional systems*. Springer-Verlag, New York, 423 p.
- Godoy, E. y Lara, L. (1998) *Cartas Chañaral y Diego de Almagro, región de Atacama*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos, Nos. 5-6, 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- Godoy, E. y Blanco, N. (2000) *Plutones Jurásico Tardíos-Cretácico Tempranos asociados al Sistema de Fallas de Atacama entre los 26°y 28°S*. En Congreso Geológico Chileno, No. 9, Actas, Vol.1, Puerto Varas, Chile, 616-620 p.
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., y Oteo, C. (2002) *Ingeniería Geológica*. Editorial Pearson. 744 p.
- Griem W., (2010) *Flora del desierto de Atacama: La Brea- Pluchea absinthiodes*. Geovirtual. <https://www.geovirtual2.cl/Museovirtual/Plantas/Brea01esp.htm>
- Grocott, J., Brown, M., Dallmeyer, R., Taylor, G. y Treloar, P. (1994) *Mechanism of Continental growth in extensional areas: An example from the Andean plate-boundary zone*. Geology, Vol. 22, 391-394 p.
- Grocott, J. y Wilson, J. (1996) *Emplacement of plutonic complexes, strain and strain partitioning in the coastal cordillera, (25°-27°S), Chile*. In Third International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG), St. Malo, France, 371-374 p.
- Haq, B., Hardenbol, J. y Vail, P. (1987) *Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic*. Science, Vol. 235, 1156 – 1167 p.
- Hauser, A., (1993) *Remociones en masa en Chile*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago. Boletín No. 45, 7-29 p.
- Hauser, A. (1997 a) *Los aluviones del 18 de junio en Antofagasta: Un análisis crítico, a 5 años del desastre*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín No. 47, 47 p.

- Hauser, A (2000), Remociones en masa en Chile. SERNAGEOMIN, 89 p. (Boletín: n° 59).
- Hauser, A. (2002). *Rock avalanche and resulting debris flow in Estero Parraguirre and Río Colorado, región Metropolitana, Chile*. Reviews in Engineering Geology 15, 135–148 P.
- Hoek, E y Marinos, P. (2000) *GSI: A Geological Friendly Tool for Rock Mass Strength Estimation*. Proceedings of the GeoEng 2000 at the International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne, 19-24 November 2000, 1422-1446 p.
- 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 p.
- Hungr, O., Leroueil, S. y Picarelli, L. (2014) *The Varnes classification of landslide types, an update*. 190 p.
- Instituto de Desarrollo Agropecuario (2016, mayo) Fruticultura Nidia Araya cosechó primeras grandas y membrillos y membrillos tras el aluvión de Atacama. INDAP. <http://www.indap.gob.cl/noticias/fruticultora-nidia-araya-cosecho-primeras-granadas-y-membrillos-tras-el-aluvion-de-atacama>
- Izquierdo, T., Abad, M., Aranza, B., Bernárdez, E., Arancibia, M. (2018) El evento *hidrometeorológico del 25M en la ciudad de Copiapó: análisis de la inundación y los daños en el casco urbano*. Aluviones y resiliencia en Atacama. Construyendo saberes sobre riesgos y desastres. 117-13 p.
- Jacoby, D. (2001). *Vulnerabilidad del sector urbano de La Reina frente a desbordes de la Quebrada de Ramón*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile
- Jayawicrama, K.J., Shaletter, J.E. y Escobar, R (1993) *Eucalypt plantation forestry in Chile*. Australian Forestry. 56: 179-192 p.

- Jorquera, R., Vivallo, W., Díaz, A. y Pizarro, N. (2003) *Depósitos mesotermales de las hojas Totoral bajo y Castilla, III región*. Servicio Nacional de Geología y Minería. Presentado en el X Congreso Geológico Chileno, Concepción, Chile.
- Kendrick, E., Bevis, M., Smalley, R.J.m Brooks, B., Vargas, R.B., Lauría, E. y Fortes, L.P.S. (2003) *The Nazca-South America Euler Vector and its Rate of Change*. Journal of South American Earth Sciences 16: 125-131p.
- Kim, J., Jeong, S., Park, S., y Sharma, J. (2004) *Influence of rainfall-induced wetting on the stability of slopes in weathered soils*. Engineering Geology No. 75. Elsevier, p. 251-262 p.
- Köppen, W. (1948) *Climatología*. Fondo de Cultura Económica, México. Primera Ed, en español. 478 p.
- 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. Universidad de Chile, 201 p.
- Latorre, C., Betancourt, J. L., Rech, J. A., Quade, J., Holmgren, C., Placzek, C., Maldonado, A., Vuille, M. y Rylander, K. (2005) *Late Quaternary history of the Atacama Desert. 23 S: the archaeology and environmental history of the southern deserts*, 73-90 p.
- Lecaros, Y. (2021) *Evaluación de susceptibilidad a la generación de flujos de detritos, ladera oriental entre las localidades Chancoquín y la Arena, Valle del Tránsito, región de Atacama*, tesis de pregrado para optar al título de Geólogo, Universidad Andrés Bello, Viña del Mar, Chile, 100 p.
- Le Roux, J.P., Gómez, C., Venegas, C., Fenner, J., Middleton, H, Marchant, M., Buchbinder. B., Frassinetti, D., Marquardt, C., Gregory-Wodzicki, K.M. y Lavenu, A. (2005) *Neogene-Quaternary coastal and offshore sedimentation in north-central Chile: Record of sea level changes and implications for Andean tectonism*. Journal of South American Earth Sciences. 19: 83-98 p.

- López, V. (2019) *Susceptibilidad de remociones en masa y evaluación de agentes desencadenantes en los alrededores de la Quebrada Santos Ossa, región de Valparaíso*, memoria de pregrado para optar al título de Geólogo, Universidad Andrés Bello, Viña del Mar, Chile, 57 p.
- Marticorena, A., Pardo, V., Peñaloza, A., Negritto, M. A., Cavieres, L. & Parada, M. (2004) *Adiciones y notas a la flora del Parque Nacional Llullaillaco, II región, Chile*. Gayana, Bot. 61(2) 49-54 p.
- Marquardt, C., Lavenu, A. y Godoy, E. (2004) *Coastal neotectonics in Southern Central Andes: Uplift and deformation of marine terraces in Northern Chile (27°S)*. Tectonophysics. 394: 193-219 p.
- Miller, H. (1970) *Vergleichende Studien an prämesozoischen Gesteinen Chiles unter besonderer Berücksichtigung ihrer Kleintektonik*. Geologische Forschungen, Vol. 36, 64 p.
- Montenegro, M. (2016) *Estudio morfoodinámico y geomorfológico del sector desembocadura Río Huasco - Tres Playitas, Atacama, Chile*. Tesis para optar al título de Geólogo, Universidad de Atacama, Chile, 133 p.
- Mofikoya, Adedayo & Bui, Thuy Nga & Kivimäenpää, Minna & Holopainen, Jarmo & Himanen, Sari J & Blande, James. (2019) *Foliar behaviour of biogenic semi-volatiles: potential applications in sustainable pest management*. Arthropod-Plant Interactions. 13 p.
- 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*. Tesis para optar al grado de magíster en ciencias mención Geología. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología, 164 p.

- Naranjo, J.A. y Paskoff, R. (1980) *Evolución geomorfológica del desierto de Atacama ante los 26° y 33° latitud Sur, revisión cronológica*. Revista Geológica de Chile 10: 85-89 p.
- Naranjo, J (1987) *Interpretación de la actividad cenozoica superior a lo largo de la Zona de Fallas de Atacama, en el Mioceno, Chile*. Revista geológica de Chile, Vol.31 37-42 p.
- Naranjo, J.A. y Varela, J. (1996) *Flujos de detritos y barro que afectaron el sector oriente de Santiago el 3 de mayo de 1993*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín No.47, 42 p.
- Nostálgica.cl (2022, julio) Activación de quebradas deja varias viviendas dañadas en Totoral. Nostálgica.cl.<https://www.nostalgica.cl/activacion-de-quebradas-deja-varias-viviendas-danadas-en-total/>
- Oliveras, I. (1975) *Geología Económica geoquímica y marco regional ampliado de los distritos auríferos Sierra Las Norias y Ligas Negras. Provincia de Atacama*. Memoria de Título (Inédito). Universidad de Chile, Departamento de Geología, 156 p.
- Ota, Y., Miyauchi, T., Paskoff, R. y Koba, M. (1995) *Plio-Quaternary terraces and their deformation along the Altos de Talinay, North-Central Chile*. Revista Geológica de Chile. 22: 89-102 p.
- 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, 151 p.
- Pardo-Casas, F., Molnar, P. (1987) *Relative motion of the Nazca (Farallon) and South American plates since Late Cretaceous time*. Tectonics 6: 233-248 p.
- Paskoff, R. (1970) *Recherches géomorphologiques dans le Chili semi-aride*. Veyret Paul, Francia, 420 p.

- Plan Regional de Ordenamiento Territorial (2019) *Diagnóstico amenazas naturales y exposición sistemas estratégicos*. Informe final. Gobierno de Chile, región de Atacama. 218 p.
- Pilger, R.H. Jr. (1984) *Cenozoic platekinematics, subduction and magmatism: South American Andes*. Journal of the Geological Society, London, 141: 793-802 p.
- Polanski, J. (1966) *Flujos rápidos de escombros rocosos en zonas áridas y volcánicas*. Editorial Universitaria de Buenos Aires, Argentina 67 p.
- Popescu, M.E., (2002) *Landslide Causal Factors and Landslide Remedial Options*. Keynote Lecture, Proceedings 3rd International Conference on Landslides, Slope Stability and Safety of Infra-Structures, Singapore, 61-81 p.
- Riquelme, R., Martinod, J., Hérail, G., Darrozes, J. y Charrier, R. (2003) *A geomorphological approach to determining the Neogene to Recent tectonic deformation in the Coastal Cordillera of northern Chile (Atacama)*. Tectonophysics 361: 255-275 p.
- Rodríguez, R. & B. Fica (2020) *Guía de Campo Plantas Vasculares Acuáticas en Chile*. Primera edición. Corporación Chilena de la Madera, Concepción, Chile, 216 p.
- Selby, M.J. (1993) *Hillslope materials and processes*. Oxford University Press, 2a. ed., 451p.
- 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, 65-77 p.
- SENAPRED (2024) *Guía Señalización por Riesgo de Remoción en Masa-Aluvión y Deslizamiento*. Primera edición, Santiago de Chile. 94 p.
- 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. 127 p.

- Señoret, F. y JP. Acosta. (2013) *Cactáceas endémicas de Chile, Guía de Campo*. Primera Edición. Corporación Chilena de la Madera, Concepción, Chile, 250 p.
- Servicio Nacional de Geología y Minería, (2015) *Glosario ilustrado para la comprensión básica de peligros geológicos*. Gobierno de Chile, 4 p
- Servicio Nacional de Geología y Minería, (2017) *Principales desastres ocurridos desde 1980 en Chile*. Informe final. Gobierno de Chile, 45 p.
- Sociedad Contractual Minera El Morro (2008). *Estudio de impacto ambiental: Proyecto El Morro*. Knight Piésold S.A. Las Condes, Santiago, Chile. 320 p.
- Somoza, R. (1998) *Updated Nazca (Farallon)-South America relative motions during the last 40 My; implications for mountain building in the Central Andean region*. Journal of South American Earth Sciences 11: 211-215 p.
- Tapia, G. (2014) *Dirección General de Aguas: Inventarios de Cuencas, Subcuencas y Subsubcuencas*. Informe técnico SDT N°364. División de Estudios y Planificación, Dirección General de Aguas, MOP, Gobierno de Chile, Santiago.53 p.
- Ugalde, H. y Capó, J.M. (1996) *Mapa magnético de la zona de Hacienda Castilla, región de Atacama*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Documentos de Trabajo, No. 9, 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- USGS (2004) *Landslide Types and Processes*. U.S. Department of the Interior. Geological Survey
- Vallenar Digital (2017, septiembre) Sence implementa en Totoral curso especial para vecinos afectados con los aluviones de mayo. Vallenar Digital. https://portalweb.vallenardigital.cl/cat-region_atacama/sence-implementa-en-total-curso-especial-para-vecinos-afectados-con-los-aluviones-de-mayo/

- Varnes, D. J. (1958). *Landslide types and processes. Landslides and engineering practice*, Special Report Washington, DC, Highway Research Board, National Academy of Sciences, 28, 20–47 p.
- Varnes, D.J. (1978) *Slope movement types and processes*. In *Landslides, Analysis and Control*, Special Report N°176. Schuster, R.L., Krizek, R.J., edits. Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington D.C., 11-33 p.
- Wieczorek G. F. (1996) *Landslide Triggering Mechanisms in Landslides – Investigations and Mitigation*. Special Report 247. A. K. Turner y R. L. Schuster, Editores. Transportation Research Board. National Research Council, National Academic Press, Washington, DC, USA,76-90 p.
- Wortel, M.J.R. (1984) *Spatial and temporal variations in the Andean subduction zone*. *Journal of Geological Society*, London. 141: 783-791p.
- Yáñez, G., Ranero, C., Von Huene, R. y Díaz, J. (2001) *Magnetic anomaly interpretation across the southern central Andes (32°-34°S): The role of the Juan Fernandez Ridge in the late Tertiary evolution of the margin*. *Journal of Geophysical Research* 106 (B4): 6325-6345 p.

ANEXOS

Anexo 1. Tabla del desglose de factores condicionantes de flujos de detritos. Modificado de Lara (2007)

Factor	Especificaciones	Rangos	
Pendiente de Ladera (f1)	Promedio de la unidad	<5°	5%
		5°-10°	15%
		>10°	20%
Pendiente canal de drenaje al pie de la ladera (f2)	Promedio de la unidad. Si la unidad es sólo canal de drenaje, el puntaje f2 se asocia a f1, quedando sólo como un puntaje otorgado por “pendiente del canal”.	<5°	1%
		5-10°	5%
		>10°	10%
Encajonamiento canal de drenaje (f3)	Dado por la geomorfología y la relación profundidad/ancho del canal. Un encajamiento alto puede reflejarse, entre otros, en un valor alto de esta razón. Puede considerarse un valor mayor a 0,7 como encajamiento alto.	alto	7%
		medio	4%
		bajo	1%
Exposición al sol (f4)	Orientación de laderas expuestas a luz solar.	alto	3%
		parcial	2%
		baja	0%
Características geológicas-geotécnicas del material (f5)	La generación de flujos se ve favorecida, entre otros, por tipos de suelo, permeabilidad, presencia de estructuras y presencia de finos. En roca: alta meteorización y frecuencia de fracturas (valores bajos de GSI a nivel de ladera), litología (rocas menos resistentes) y alteraciones.	Muy favorable	25%
		favorable	18%
		Medianamente favorable	13%
		Poco favorable	8%
		Muy poco favorable	3%
Redes de transporte gravitacional de agua (f6)	Drenajes secundarios y evidencias de llanuras de inundación	Muy favorable	10%
		Favorable	7%
		Poco favorable	3%
		Sin antecedentes	2%

Acumulación de nieve (f7)	Según estacionalidad	siempre	5%
		estacional	2%
		esporádico	1%
		Nula	0%
Cobertura vegetal (f8)	Densidad en la ladera	Nula a baja	5%
		moderada	3%
		alta	0%
Obstrucción de canal de drenaje (f9)	No considera estructuras destinadas a contener los flujos	Importante	5%
		moderada	4%
		baja	2%
		No observado	0%
Desestabilización artificial de laderas (f10)	Por ejemplo, cortes artificiales en laderas, construcción de terraplenes, etc.	Importante	5%
		Poco importante	3%
		No observado	0%
Aluviones declarados en la hoya hidrográfica (f11)	Información escrita y/u observación de depósitos de flujos en la zona de estudio. Considerar como eventos frecuentes aquellos con recurrencia ≤ 10 años.	Históricos frecuentes	10%
		Históricos poco frecuentes	7%
		prehistórico	4%
		Sin antecedentes	1%
Tipo de material (f12)	En este caso, el material roca no está en estudio, por lo tanto, pondera 0 al resto de los factores.	suelo	1
		roca	0







Anexo 2. Tabla del desglose de factores condicionantes de deslizamientos en rocas. Lara (2007)

Factor	Especificaciones	Rangos	%
Pendientes de laderas (f1)	Promedio de la unidad	15°-20°	11%
		20°-25°	15%
		25°-30°	20%
		30°-40°	25%
		40-60°	30%
		>60°	35%
Características geológicas-geotécnicas del material (f2)	Su generación se ve favorecida por el alto grado de fracturamiento, alta meteorización y presencia de agua en el macizo. La orientación de fracturas permitirán identificar el tipo de deslizamiento: deslizamiento plano (superficie de deslizamiento en el sentido de la ladera), cuña (por intersección de estructuras) o toppling (fracturas opuestas al sentido de la ladera). Puede considerarse valores bajos de RMR (<30) -modificado según orientación de estructuras en laderas- como indicativo aproximado de condiciones muy favorables para generación de deslizamientos.	Muy favorable	35%
		Favorable	28%
		Medianamente favorable	18%
		Poco favorable	11%
		Muy poco favorable	4%
Acumulación de nieve (f3)	Según estacionalidad.	Siempre	5%
		Estacional	2%
		Esporádica	1%
		Nula	0%
Desestabilización artificial de laderas (f4)	Por ejemplo, cortes artificiales en laderas, construcción de terraplenes, etc.	Importante	10%
		Poco importante	5%
		No observado	0%
Deslizamientos declarados en la ladera (f5)	Información escrita y/u observación de superficies de deslizamiento.	Presente	15%
		Sin antecedentes	5%
		No observado	0%
Tipo de material (f6)	En este caso, el material suelo no está en estudio, por lo tanto pondera por 0 al resto de los factores	Suelo	0
		Roca (<1-1.5 m de suelo)	1

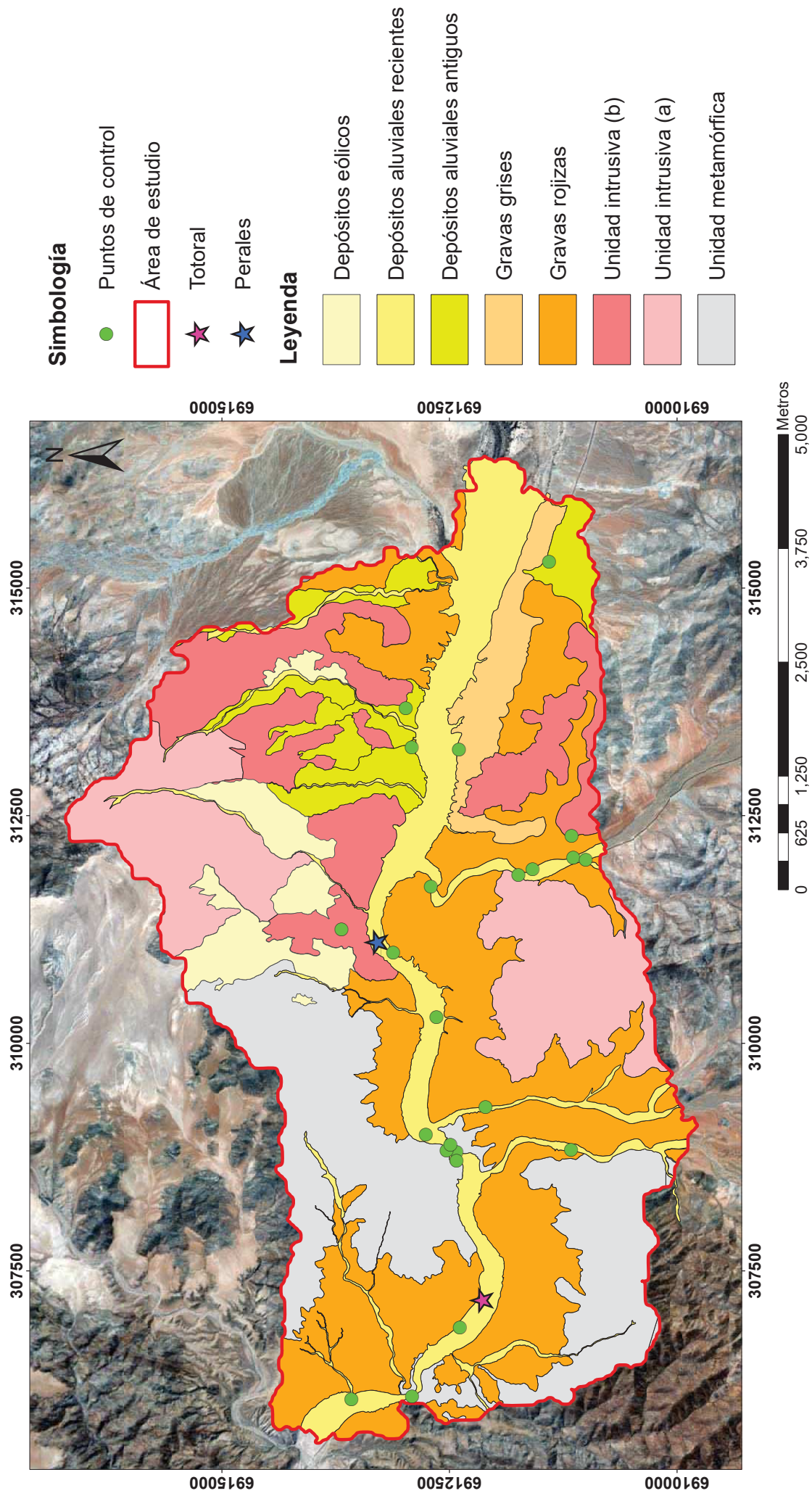
Anexo 3. Tabla del desglose de factores condicionantes de desprendimiento o caída de rocas. Lara (2007)

Factor	Especificaciones	Rango	%
Pendientes de laderas (f1)	Promedio de la unidad	15°-20°	4%
		20-25°	10%
		25°-30°	18%
		30-40°	25%
		40-60°	32%
		>60°	35%
Características geológicas-geotécnicas del material (f2)	Será más favorable a medida que presente estructuras subverticales en el macizo, alta frecuencia de fracturas y orientación de fracturas en el sentido de la ladera. Se consideran además los factores generadores de deslizamientos de roca.	Muy favorable	35%
		Favorable	24%
		Medianamente favorable	15%
		Poco favorable	9%
		Muy poco favorable	3%
Acumulación de nieve (f3)	Asociado a procesos de hielo/deshielo, que contribuyen en las caídas de rocas debido a la generación de esfuerzos en tracción en la roca.	Estacional	10%
		Siempre	4%
		Esporádica	2%
		Nula	0%
Desestabilización artificial de laderas (f4)	Por ejemplo, cortes artificiales en laderas, construcción de terraplenes, etc.	Importante	5%
		Poco importante	3%
		No observado	0%
Caídas declaradas en la ladera (f5)	Presencia de bloques caídos	Presente	15%
		No observado	0%
Tipo de material (f6)	En este caso el material suelo no está en estudio, por lo tanto, pondera por 0 al resto de los factores.	Suelo	0
		Roca (cobertura aproximada <1m-1.5 m de suelo)	1

Anexo 4. Índice de resistencia geológica (GSI) Hoek y Marinos, 2000

INDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICO GSI (Hoek & Marinos, 2000). A partir de la litología, estructura y la condicion de superficie de las discontinuidades, se estima el valor promedio de GSI. No intente ser muy preciso. Escoger un rango de 33 a 37 es mas realista que fijar GSI=35. Tambien notar que esta tabla no se aplica a mecanismos de falla controlado por estructuras. Donde se presenten planos estructuralmente debiles en una orientacion desfavorable con respecto a la cara de la excavacion, estos dominaran el comportamiento del macizo rocoso. La resistencia al corte de las superficies en rocas que son propensas a deteriorarse como resultado de cambios en la humedad, se reducira cuando exista presencia de agua. Cuando se trabaje con rocas de categoria regular a muy mala, puede moverse hacia la derecha para condiciones humedas. La presion de poros se maneja con un analisis de esfuerzos efectivos.		CONDICIONES SUPERFICIALES				
		MUY BUENA Muy rugoso. Superficies frescas sin meteorización	BUENO Rugoso. ligeramente meteorizada. superficies con oxido.	REGULAR Lizas, moderadamente meteorizadas y superficies alteradas.	MALA Espejo de falla, altamente meteorizadas con recubrimiento compacto o rellenos o fragmentos	MUY MALA Espejo de falla, superficies altamente meteorizadas con recubrimiento de arcilla suave o rellenos
ESTRUCTURA		DISMINUYE CALIDAD DE SUPERFICIE →				
	Intacta o Masivo: Especimenes de roca intacta o masivo in roca in situ con pocas discontinuidades ampliamente espaciadas.	90			N/A	N/A
	Levemente fracturado: Macizo rocoso no disturbado, muy bien entrelazado, constituido por bloques cubicos formados por tres familias de discontinuidades	80	70			
	Moderadamente Fracturado: Entrelazado, macizo rocoso parcialmente disturbado con bloques angulosos de varias caras formado por 4 o mas familias de discontinuidades		60	50		
	Muy Fracturado/Disturbado/Agrietada: Foleada con bloques angulosos formados por la interseccion de muchas familias de discontinuidades. Persistencia de planos de estratificacion o esquistocidad			40	30	
	Desintegrado: Pobremente entrelazado, macizo altamente fracturado compuesto de una mezcla de pedazos de rocas angulosas y redondeadas				20	
	Foliado/Laminado/Cizallado: Falta de formacion de bloques debido al pequeño espaciamento o esquistocidad débil o planos de corte					10

Anexo 5. Mapa de unidades litológicas



Anexo 6. Descripción macroscópica de muestras obtenidas en terrenos

Anexo 6.1. Descripción macroscópica, con sus respectivas coordenadas

Muestra P11		
Coordenadas	N 6.912.911	E 306.121
Descripción	Imagen de la muestra	
Roca metamórfica de contacto regional foliada de color negro, de grano muy fino con presencia de 10 % de micas.		
Nombre: Filita		


Anexo 6.2. Descripción macroscópica, con sus respectivas coordenadas

Muestra P20		
Coordenadas	N 6.912.530	E 308.823
Descripción	Imagen de la muestra	
Roca metamórfica de contacto, no foliada de color café claro con tonalidades de negro, granoblástica, con fragmentos de feldespato potásico y cuarzo, con presencia de patinas de óxido de Fe (jarosita).		
Nombre: hornfels / corneana		

Anexo 6.3. Descripción macroscópica, con sus respectivas coordenadas

Muestra P2		
Coordenadas	N 6.911.742	E 311.847
Descripción	Imagen de la muestra	
Roca ígnea intrusiva, con textura holocristalina, fanerítica, inequigranular, de tamaño de los cristales de medio a grano grueso. Su composición mineral es de 16% de cuarzo y 72% de plagioclasa y 12% máficos. Los máficos se encuentran alterados a clorita y epidota, también se observan vetillas de clorita		
Nombre: cuarzodiorita, Streckeisen (1979)		

Anexo 6.4. Descripción macroscópica de muestras obtenidas en terrenos

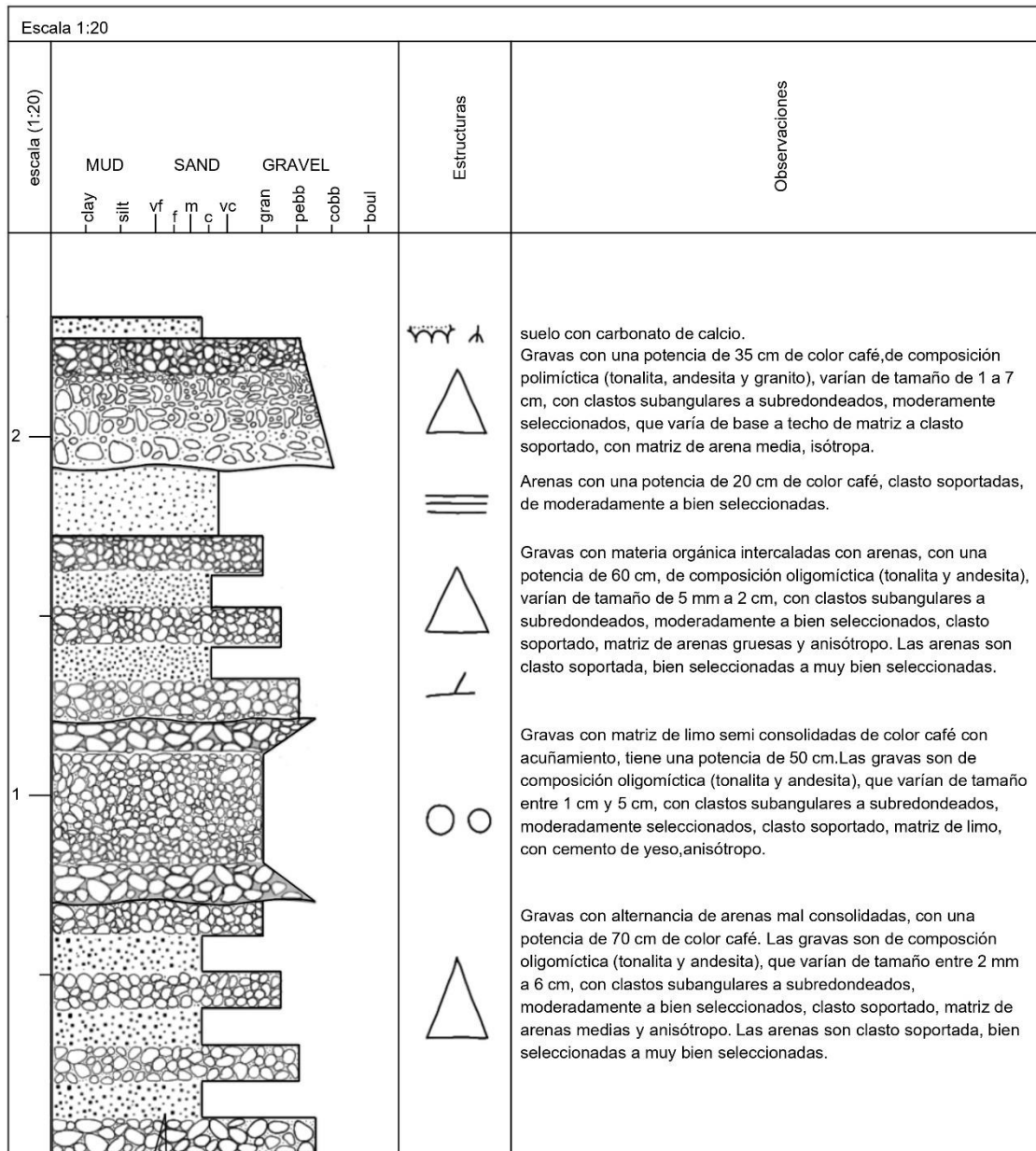
Muestra P4		
Coordenadas	N 6.911.157	E 312.280
Descripción	Imagen de la muestra	
Roca ígnea intrusiva, con textura holocristalina, fanerítica, inequigranular, de tamaño de los cristales de medio. Su composición mineral es de 30% de cuarzo y 55% de plagioclasa y 15% máficos que se encuentran alterados a clorita, además presenta vetillas de cuarzo. Esta roca dependiendo de su ubicación varía su composición de biotita.		
Nombre: Tonalita, Streckeisen (1979)		

Anexo 7. Detalles de las columnas estratigráficas

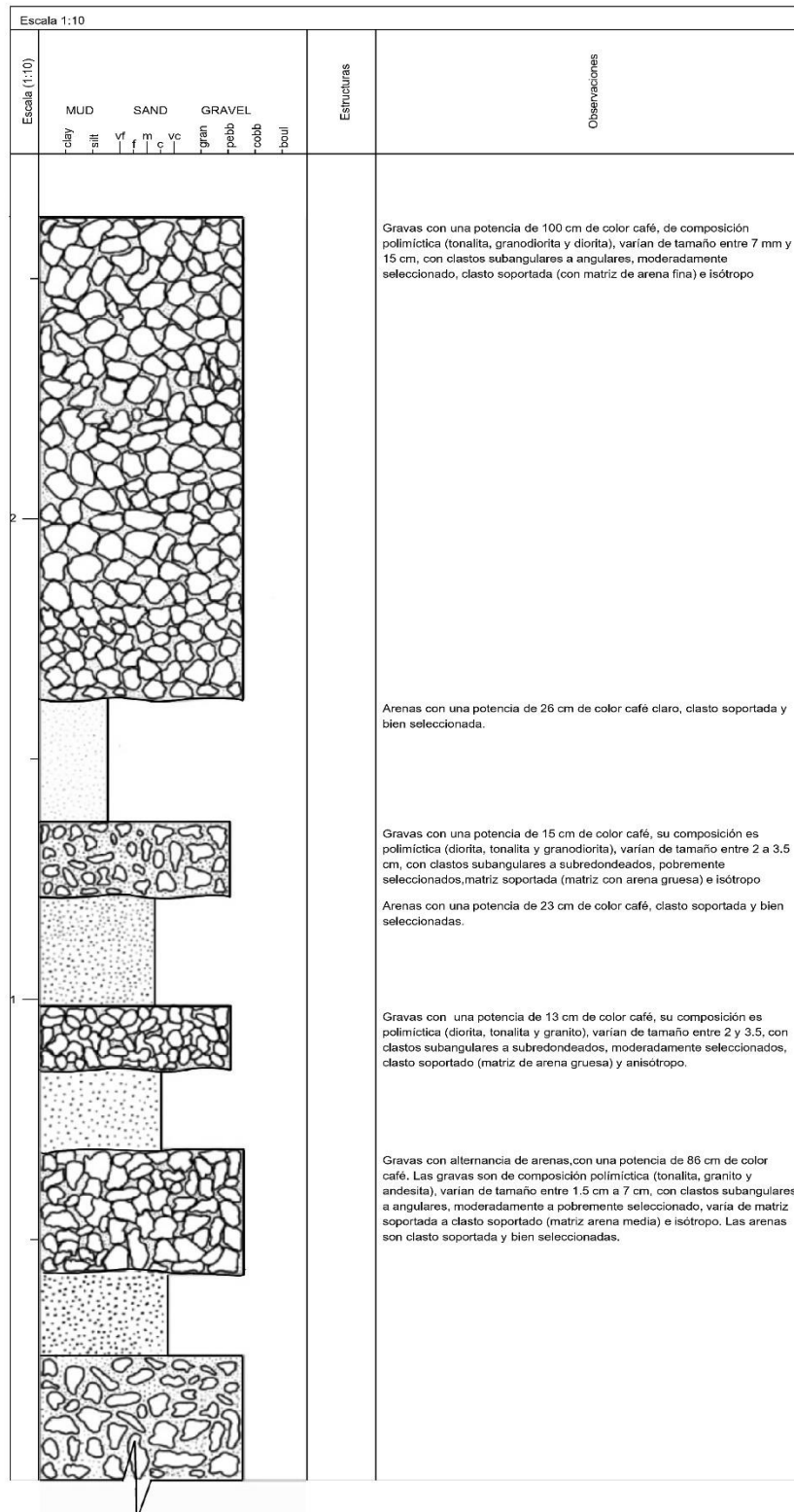
Anexo 7.1. Leyenda, estructuras sedimentarias y simbología de las columnas estratigráficas

Leyenda	Estructuras sedimentarias	Simbología			
	Gravas matriz soportada (matriz de arena)		Gradación grano decreciente		contacto erosivo
	Gravas clasto soportada (matriz de arena)		Nódulos		Base no visible
	Gravas clasto soportada (matriz de limo)		Laminación cruzada		
	Arenas finas		Laminación paralela		
	Arenas medias		Grietas de desecación		
	Arenas gruesas		Bioturbación ligera		
			Raíces		
			Fósiles indiferenciados		

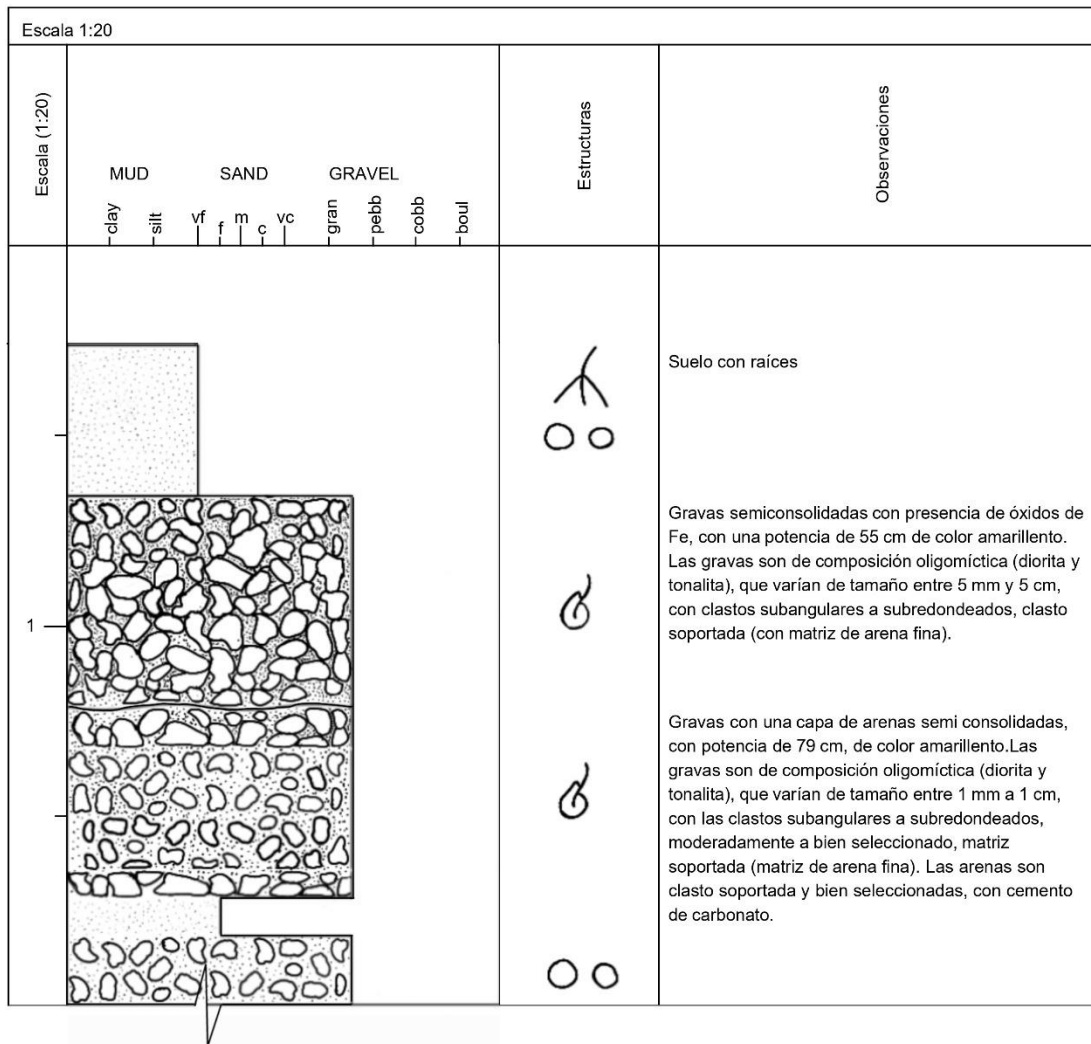
Anexo 7.2. Columna estratigráfica de las gravas grises, escala 1:20. Elaboración propia con el software SedLog 3.1. Coordenadas N 6.912.395 m y E 313.227 m



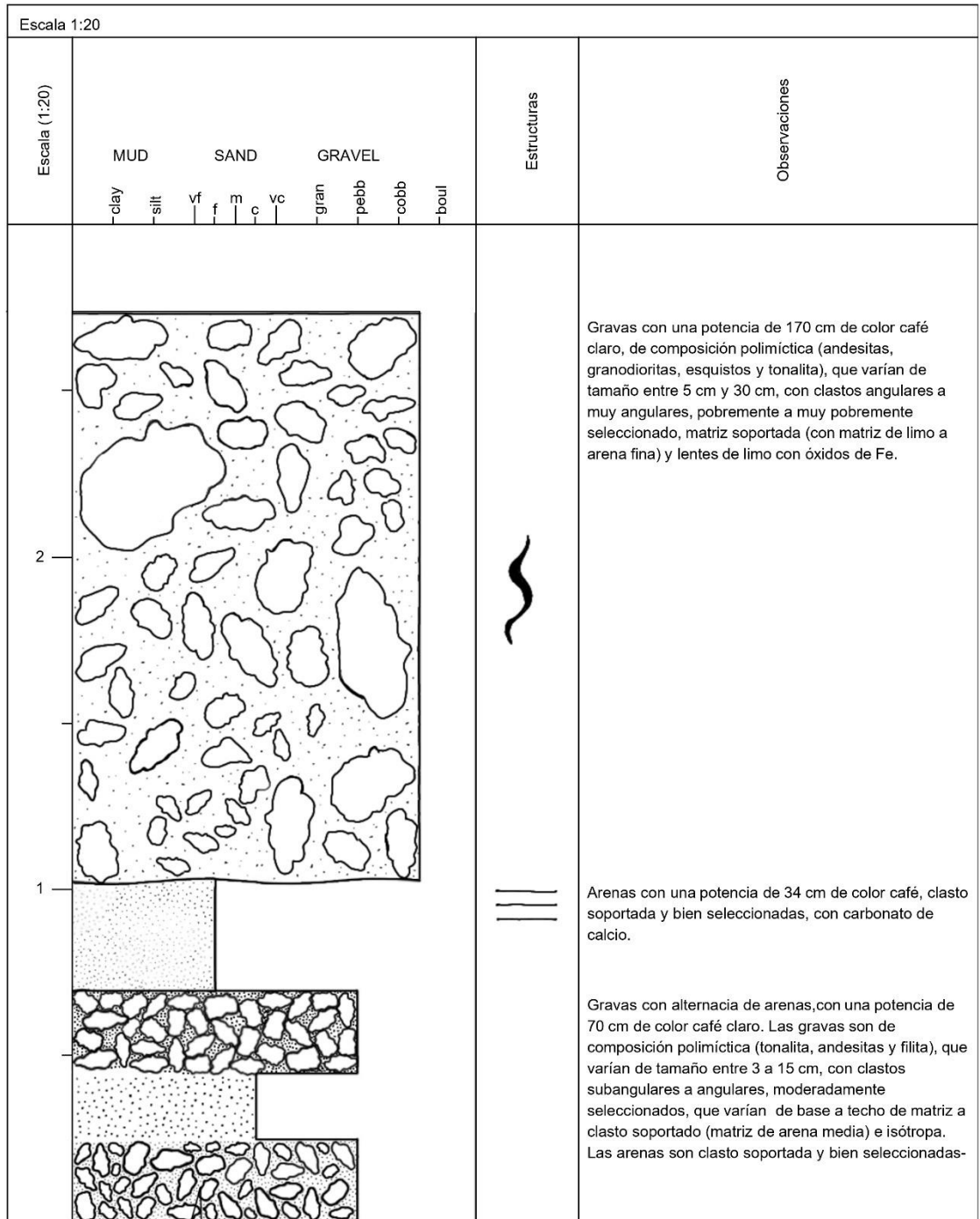
Anexo 7.3. Columna estratigráfica de las gravas rojizas, escala 1:10. Elaboración propia con el software SedLog 3.1. Coordenadas N 6.912.703 m y E 311.721 m



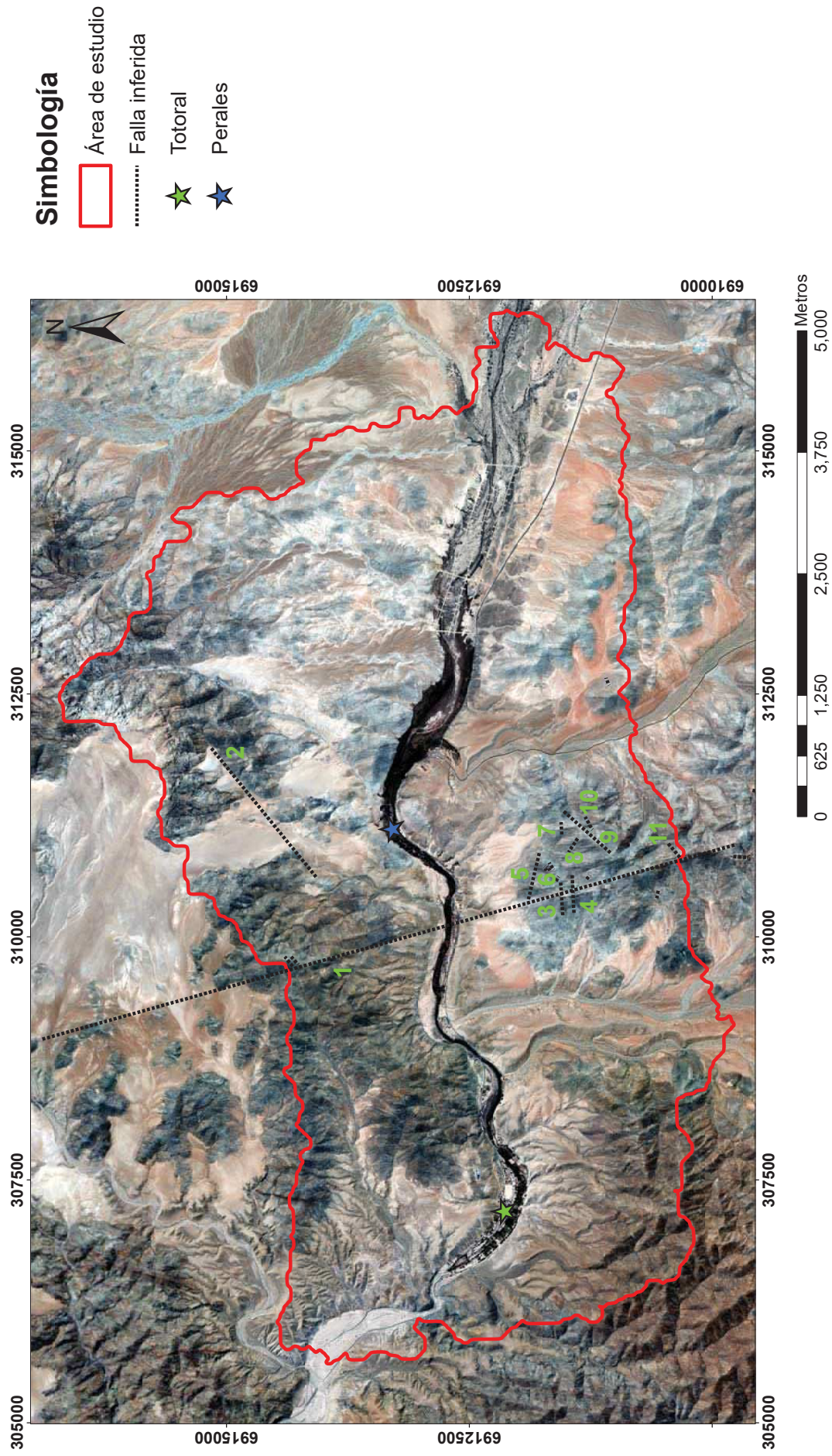
Anexo 7.4. Columna estratigráfica del depósito aluvial antiguo, escala 1:20. Elaboración propia con el software SedLog 3.1. Coordenadas N 6.912.914 m y E 313.253 m



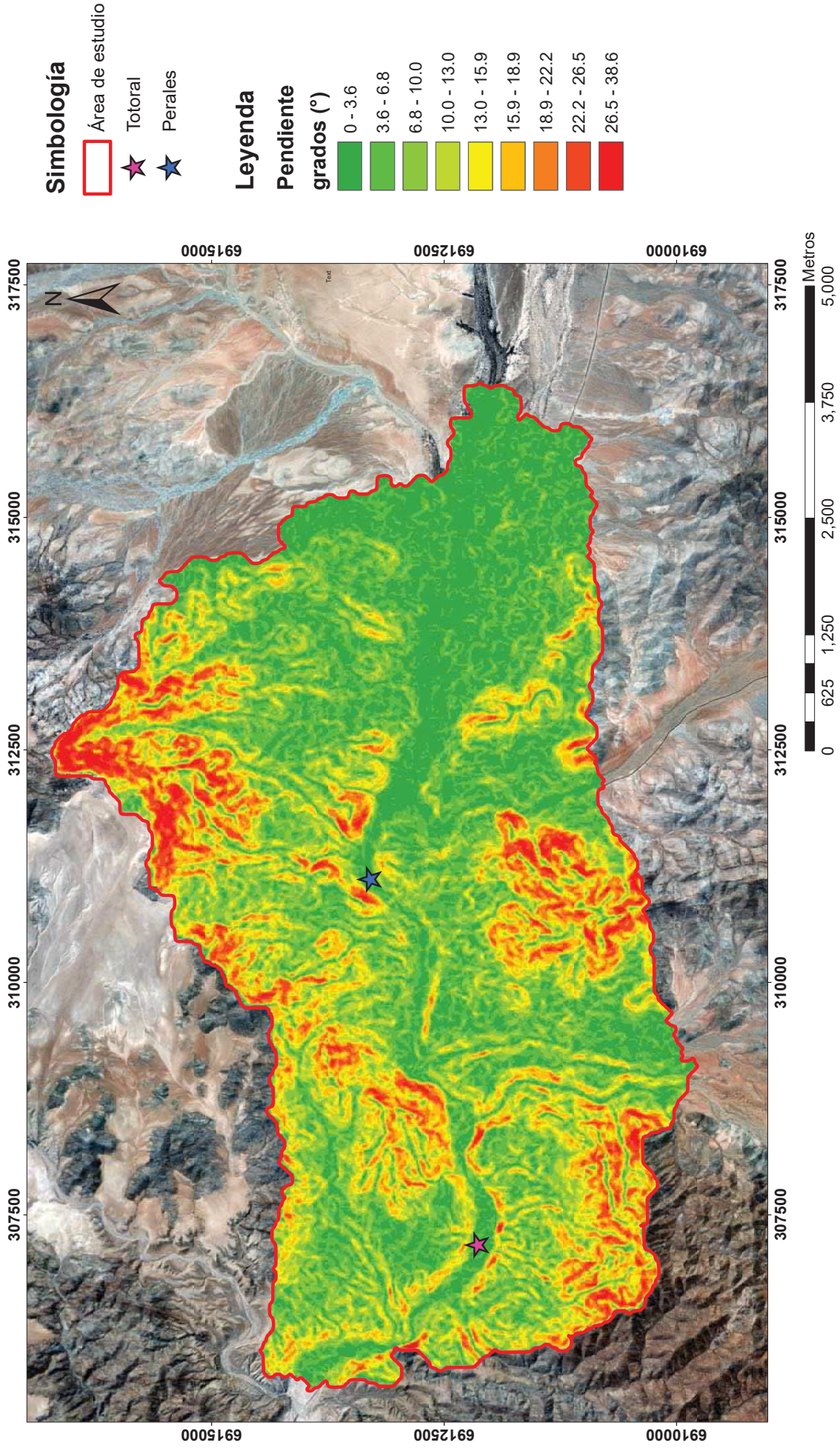
Anexo 7.5. Columna estratigráfica del depósito aluvial antiguo, escala 1:20. Elaboración propia con el software SedLog 3.1. Coordenadas N 6.913.576 m y E 306.087 m



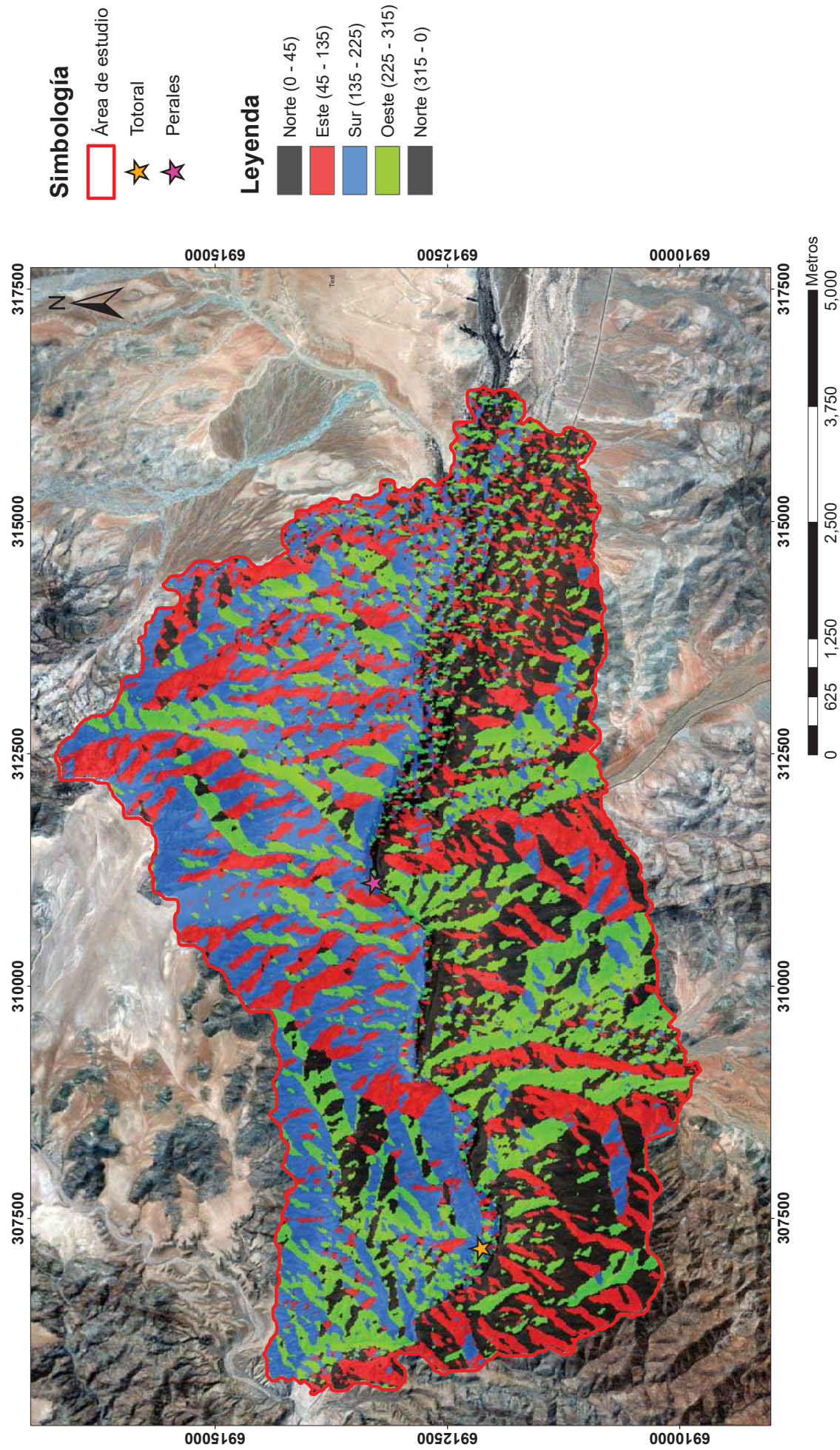
Anexo 8. Mapa geología estructural



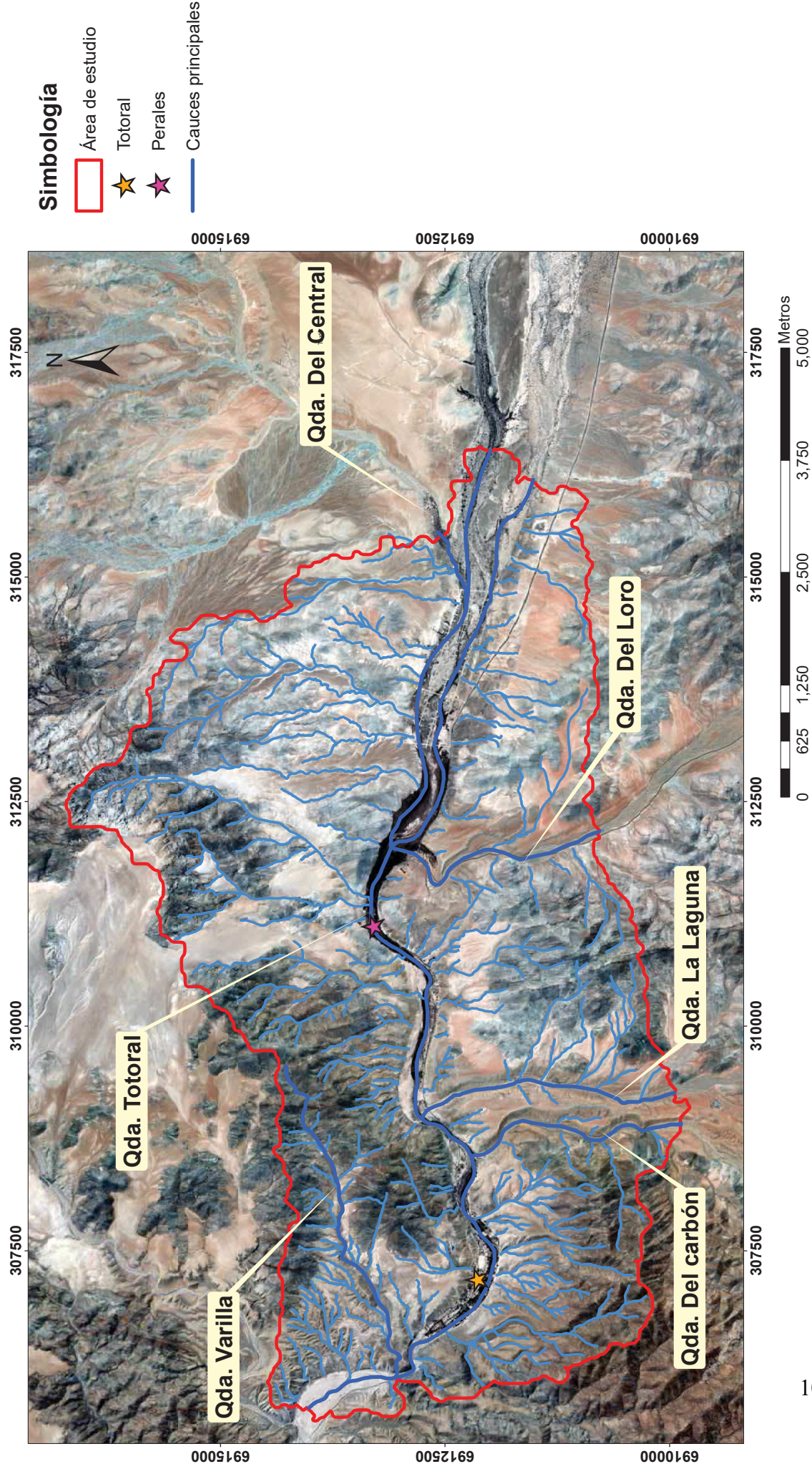
Anexo 9.1 Mapa de elevación digital de las pendientes de la zona de estudio



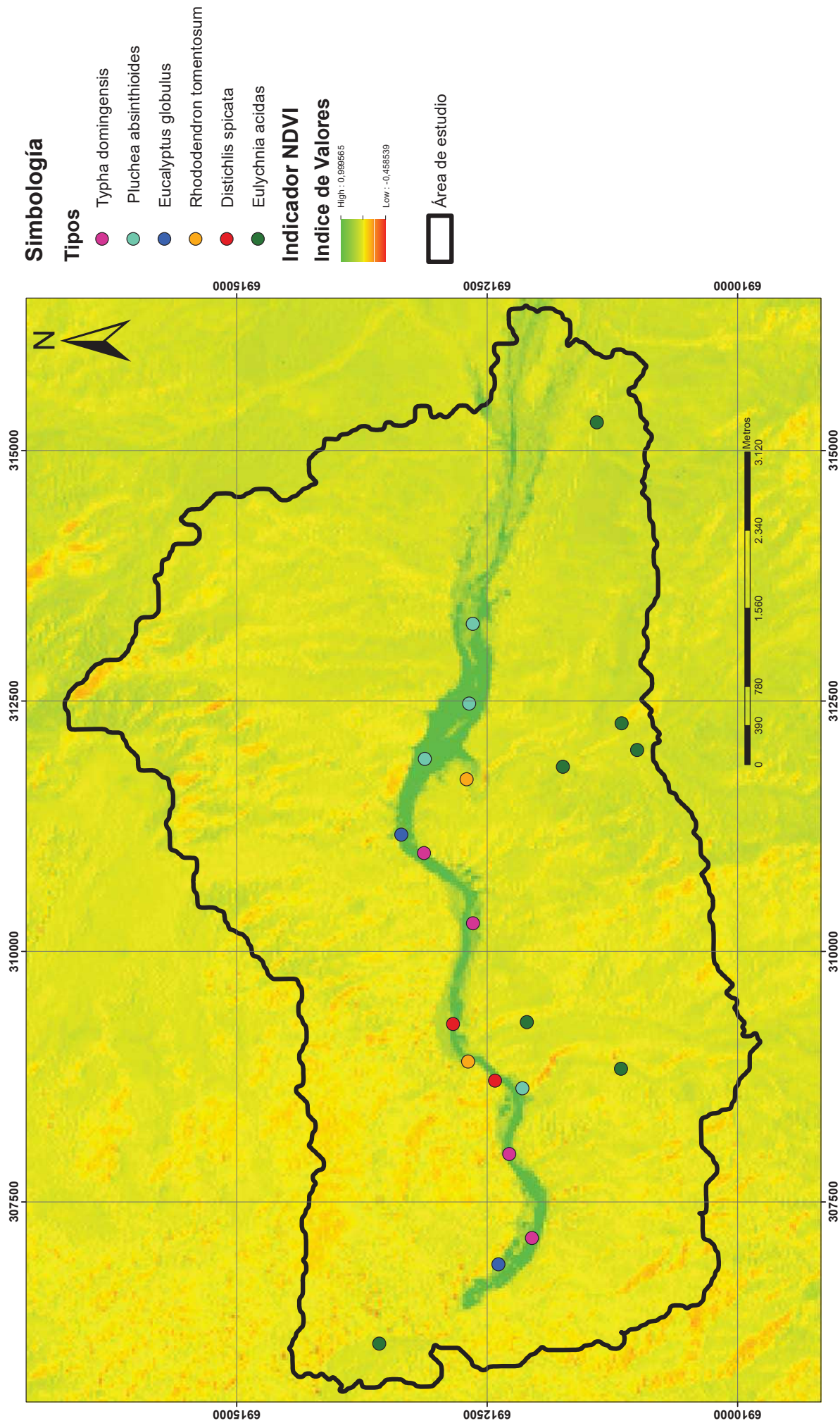
Anexo 9.2. Mapa de la exposición solar según la orientación de laderas



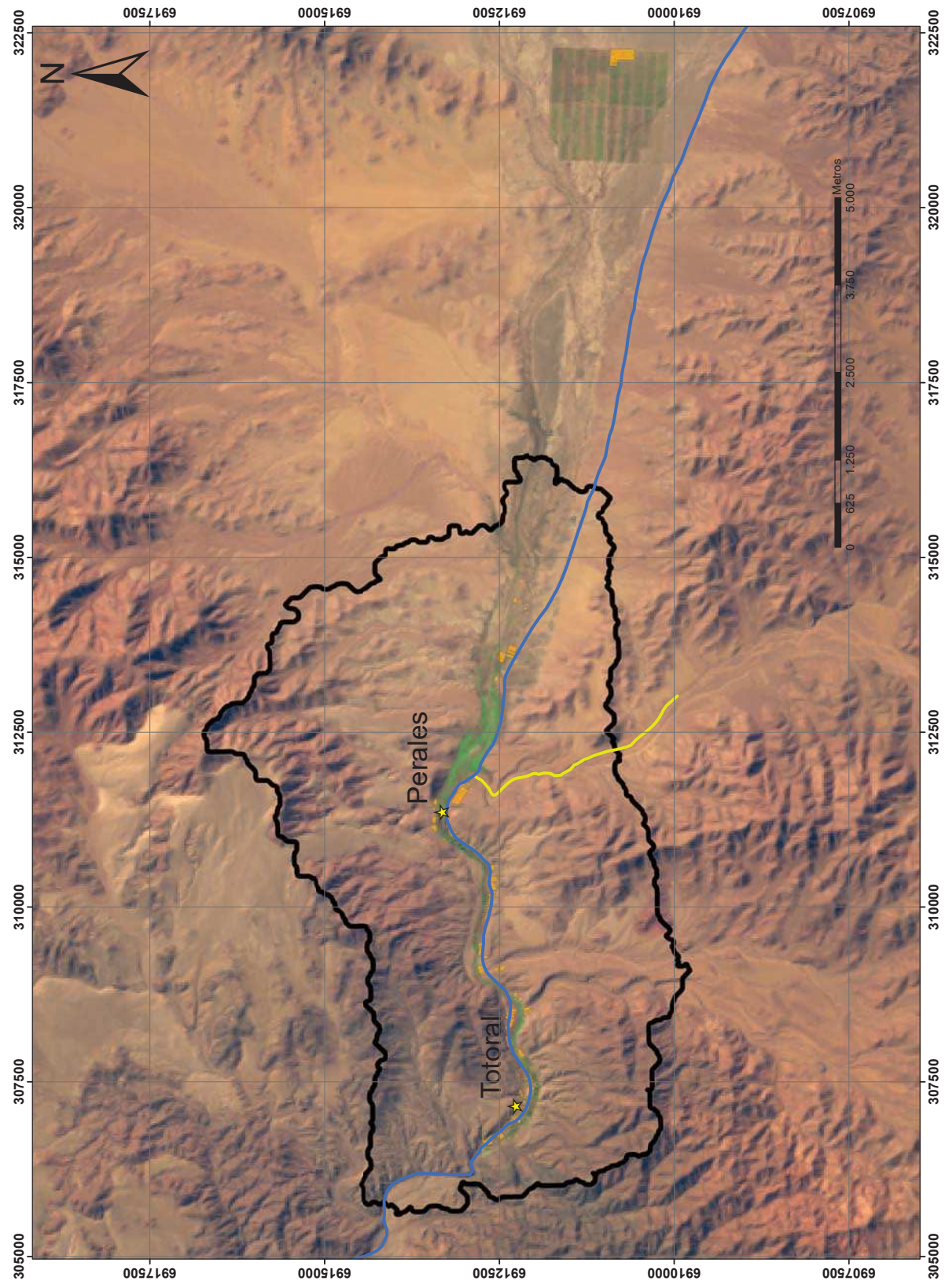
Anexo 10. Mapa de cauces principales y redes de drenajes



Anexo 11. Mapa con índice de vegetación de diferencia normalizada



Anexo 12. Mapa de falso color para detección de zonas urbanas



Anexo 13. Encuesta realizada a los habitantes de Totoral y Perales

06/07/2024



UNIVERSIDAD DE ATACAMA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

Encuesta habitantes Totoral

Aluvión año 2015

- 1) **¿Estuvo en Totoral en el aluvión del 2015?**
 - a) Si
 - b) No
 - 2) **Si su respuesta fue si, ¿fue afectada su vivienda?**
 - a) Si
 - b) No
 - 3) **Si su respuesta fue si, ¿qué daños sufrió su vivienda?**
 - a) Daño reparable leve
 - b) Daño reparable moderado
 - c) Daño reparable mayor
 - d) Daño no reparable
 - 4) **¿Fue su vivienda afectada por...?**
 - a) Agua de las laderas
 - b) Activación de las quebradas
 - c) ambos
 - 5) **¿Fue su huerto afectado?**
 - a) Si
 - b) No
 - 6) **¿Quedó aislado/a?**
 - a) Si
 - b) No
 - 7) **Si su respuesta fue si, ¿cuánto tiempo?**
-

8) ¿Qué quebradas aumentaron su caudal?



9) ¿Qué medidas preventivas se tomaron luego del aluvión?

Aluvión año 2017

10) ¿Estuvo en Totoral en el aluvión del 2015?

- a) Si
- b) No

11) Si su respuesta fue si, ¿fue afectada su vivienda?

- a) Si
- b) No

12) Si su respuesta fue si, ¿qué daños sufrió su vivienda?

- e) Daño reparable leve
- f) Daño reparable moderado
- g) Daño reparable mayor
- h) Daño no reparable

13) ¿Fue su vivienda afectada por...?

- a) Agua de las laderas
- b) Activación de las quebradas
- c) Ambos

14) **¿Fue su huerto afectado?**

- a) Si
- b) No

15) **¿quedó aislado/a?**

- a) Si
- b) No

16) **Si su respuesta fue si, ¿cuánto tiempo?**

17) **¿Qué quebradas aumentaron su caudal?**



18) **¿Qué medidas preventivas se tomaron luego del aluvión?**

Lluvias julio 2022

19) **¿Estuvo en Totoral para las precipitaciones ocurridas en julio de 2022?**

- a) Si
- b) No

20) **Si su respuesta fue si, ¿fue afectada su vivienda?**

- a) Si
- b) No

21) **Si su respuesta fue si, ¿qué daños sufrió su vivienda?**

- i) Daño reparable leve
- j) Daño reparable moderado

- k) Daño reparable mayor
- l) Daño no reparable

22) **¿Fue su vivienda afectada por...?**

- a) Agua de las laderas
- b) Activación de las quebradas
- c) ambos

23) **¿Fue su huerto afectado?**

- a) Si
- b) No

24) **¿Quedó aislado/a?**

- a) Si
- b) No

25) **Si su respuesta fue si, ¿cuánto tiempo?**

26) **¿Qué quebradas aumentaron su caudal?**



27) **¿Qué medidas preventivas se tomaron luego de estas lluvias?**

Anexo 14. Resultados de las encuestas de los habitantes de Totoral y Perales

1) ¿Estuvo en Totoral en el aluvión del ...?			
	2015	2017	2022
Si	55 (78.6 %)	60 (85.7 %)	65 (92.9 %)
No	15 (21.4 %)	10 (14.3 %)	5 (7.1 %)
2) Si su respuesta fue si, ¿fue afectada su vivienda?			
	2015	2017	2022
Si	15 (21.4 %)	25 (35.7 %)	15 (21.4 %)
No	55 (78.6 %)	45 (64.3 %)	55 (78.6 %)
3) Si su respuesta fue si, ¿qué daños sufrió su vivienda?			
	2015	2017	2022
Daño reparable leve	15 (21.4 %)	20 (28.6 %)	10 (14.3 %)
Daño reparable moderado	0 %	5 (7.1 %)	0 %
Daño reparable mayor	0 %	0 %	5 (7.1 %)
Daño no reparable	0 %	0 %	0 %
No aplica	55 (78.6 %)	45 (64.3 %)	55 (78.6 %)
4) ¿Fue su vivienda afectada por...?			
	2015	2017	2022
Agua de las laderas	0 %	0 %	5 (7.1 %)
Activación de las quebradas	15 (21.4 %)	25 (35.7 %)	10 (14.3 %)
Ambos	0 %	0 %	0 %
No aplica	55 (78.6 %)	45 (64.3 %)	55 (78.6 %)
5) ¿Fue su huerto afectado?			
	2015	2017	2022
Si	40 (57.1 %)	45 (64.3 %)	40 (57.1 %)
No	30 (42.9 %)	25 (35.7 %)	30 (42.9 %)
6) ¿Quedó aislado/a?			
	2015	2017	2022
Si	55 (78.6 %)	60 (85.7 %)	65 (92.9 %)

No	0 %	0 %	0 %
No aplica	15 (21.4 %)	10 (14.3 %)	5 (7.1 %)
7) Si su respuesta fue si, ¿cuánto tiempo?			
	2015	2017	2022
1-3 días	30 (42.9 %)	40 (57.1 %)	55 (78.6 %)
1 semana	5 (7.1 %)	0 %	10 (14.3 %)
2 semanas	10 (14.3 %)	20 (28.6 %)	0 %
1 mes	10 (14.3 %)	0 %	0 %
No aplica	15 (21.4 %)	10 (14.3 %)	5 (7.1 %)
8) ¿Qué quebradas aumentaron su caudal?			
	2015	2017	2022
Quebrada Totoral	0%	0%	0%
Quebrada Del Carbón	0%	0%	0%
Quebrada La Laguna	0%	0%	0%
Quebrada Del Central	0%	0%	0%
Quebrada Varilla	0%	0%	0%
Quebrada Del Loro	0%	0%	0%
Todas	55 (78.6 %)	60 (85.7 %)	65 (92.9 %)
No aplica	15 (21.4 %)	10 (14.3 %)	5 (7.1 %)
9) ¿Qué medidas preventivas se tomaron luego del aluvión?			
No se implementaron medidas preventivas, sólo se brindaron suministros básicos y apoyo para la recuperación, tales como:			
	2015	2017	2022
Vialidad	15 (21.4 %)	15 (21.4 %)	10 (14.3 %)
Limpieza a la propiedad	5 (7.1 %)	5 (7.1 %)	20 (28.6 %)
No aplica	50 (71.4 %)	50 (71.4 %)	35 (50.0 %)
Kit de emergencia	0 %	0 %	5 (7.1 %)

Anexo 15. Fotografías del Aluvión de 2017, Totoral, III región, Chile

Anexo 15.1 Fotografía del aluvión en la Quebrada Totoral en el año 2017. Fuente: Cristián Vitali



Anexo 15.2 Fotografía del aluvión 2017. Fuente: Cristián Vitali.

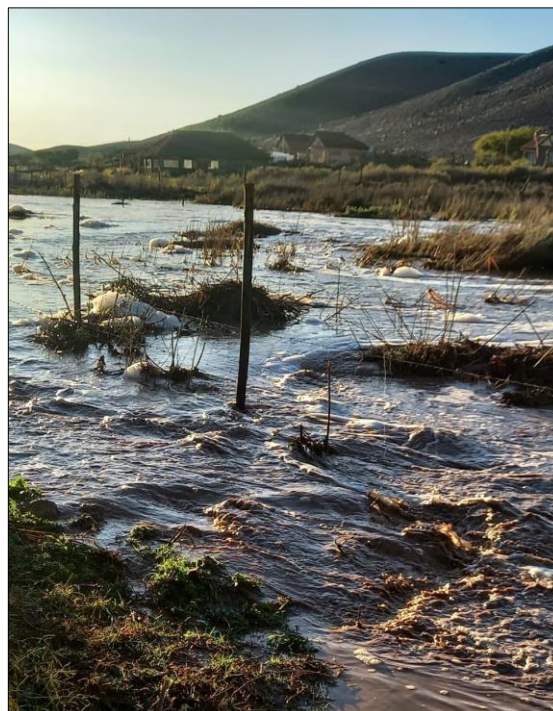


Anexo 16. Fotografías Lluvias 2022, Totoral, III región, Chile

Anexo 16.1 Fotografía de vivienda afectada por la activación de las quebradas, en la unión de la quebrada Totoral con la quebrada La Laguna. Fuente: Sara Vallejo



Anexo 16.2 Fotografía del aumento en nivel del agua en la quebrada Totoral. Fuente: Juan Reinuaba y Erika Morales



Anexo 16.3 Fotografía del aumento de nivel de agua en Totoral. Fuente: Sara Vallejo



Anexo 16.4 Fotografía del aumento del nivel de agua en la carretera C-416 en Totoral. Fuente: Sara Vallejo



Anexo 16.5 Fotografía del aluvión de 2022 cortando la carretera C-416. Fuente: Juan Reinuaba y Erika Morales



Anexo 16.6. Fotografía del corte de la carretera C-416 para el aluvión de 2022. Fuente: Sara Vallejo



Anexo 17. Fotografías del cambio geomorfológico posterior al aluvión 2017. Fuente: propia

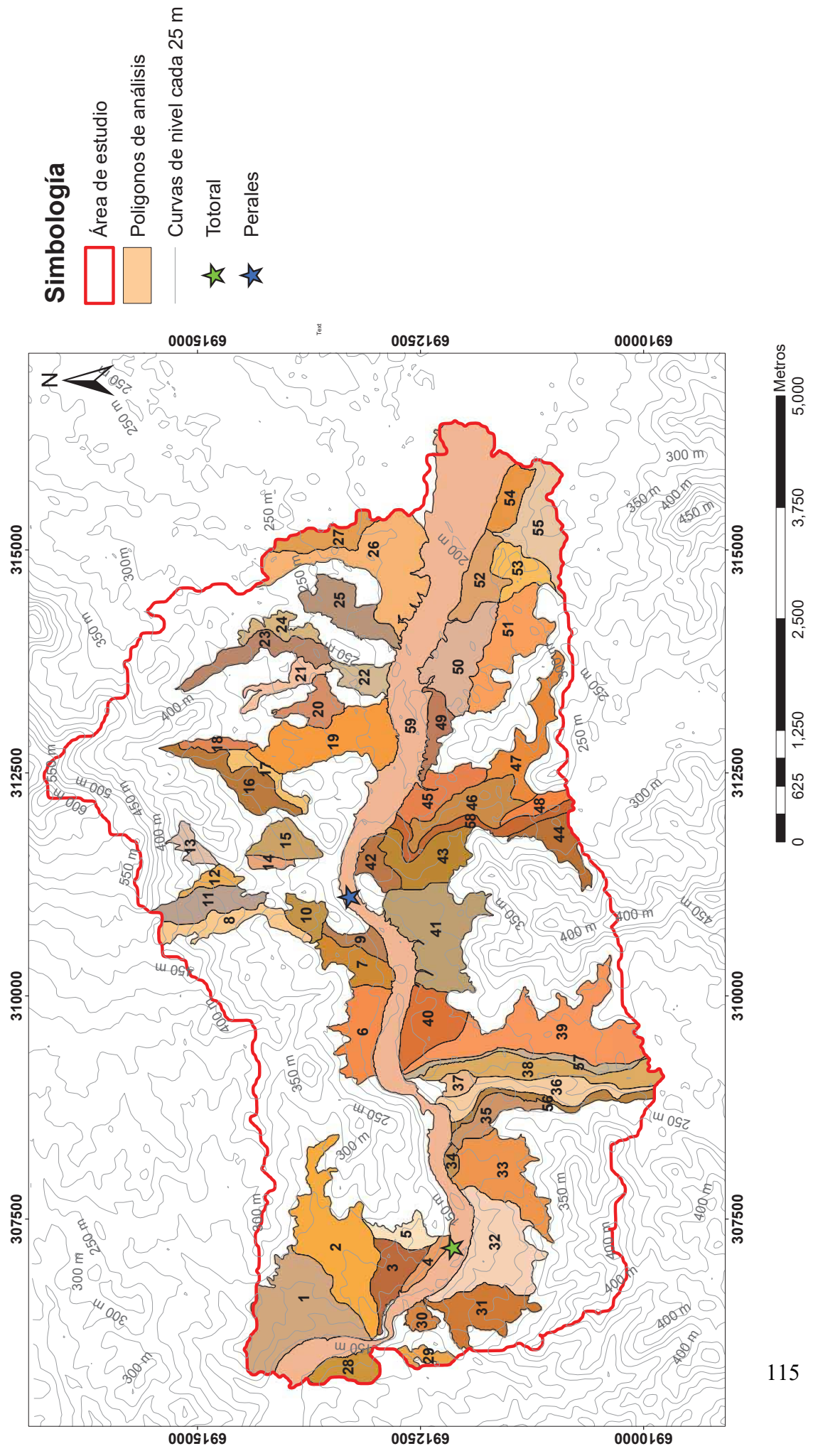
Anexo 17.1. Fotografía del cambio geomorfológico en la quebrada Totoral posterior al aluvión de 2017. Coordenadas N 6.913.320 y E 311.351, vista N-S. Fuente: propia



Anexo 17. 2. Fotografía del cambio geomorfológico (terrazas) en la quebrada Totoral posterior al aluvión de 2017. Coordenadas N 6.913.331 y E 311.344, vista NW-SE. Fuente: propia



Anexo 18. Mapa de unidades geomorfológicas



Anexo 19. Mapa de Índice de Susceptibilidad de flujos de detritos y/o barro

