



## Simulación de caídas de rocas y evaluación de riesgo de una ladera en la ruta de acceso al Volcán Antuco y paso fronterizo Pichachén, Chile.

*R. Contreras Urrutia<sup>1</sup>, R. King St-Onge<sup>2</sup>, J. Montenegro Cooper<sup>3</sup>*

### RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo evaluar el riesgo de caídas de rocas de una ladera en el PK 82.3 de la Ruta Q-45. El afloramiento, de 60 m de altura e inclinación de 85°, está formado por materiales de las diferentes erupciones del Volcán Antuco y presenta una baja competencia, que es fácilmente susceptible a la erosión. Las discontinuidades fueron proyectadas en la Red de Schmidt para visualizar su disposición en relación a la cara de la ladera. Estas se deben a sus característicos sistemas de juntas conformados en los basaltos columnares y que generan un alto riesgo de caída de rocas al presentar zonas levemente meteorizadas debido a las variabilidades climáticas. Al caracterizarse con el método empírico (RMR), que indica un valor de 65 para la parte (I) y 62 para la parte (II), la calidad del macizo rocoso resulta ser moderadamente buena. Mediante el software Rocfall V.2, se realizaron simulaciones de las trayectorias, velocidades de traslación y energía cinética. Aquello permite comparar el efecto de los diferentes grupos de rocas dependiendo de su altura de caída y su peso. Los resultados del análisis de caída de rocas revelaron que el 100% de las rocas llega a la calzada de la ruta. La energía, la altura de rebote y la velocidad alcanzada para los bloques de 20 t se considera entre rangos de 300 a 1500 kJ, de 1.3 a 4 m y de 4 a 12 m/s, respectivamente. Al mismo tiempo, los resultados de la energía, la altura de rebote y la velocidad alcanzada para los bloques de 1.6 t se considera entre rangos de 100 a 300 kJ, de 0.7 a 4.5 m y de 7 a 27 m/s, respectivamente. En base a estos resultados, se han sugerido medidas de protección mediante una barrera tipo cortina para guiar los futuros desprendimientos de rocas desde la corona hacia la parte baja de la ladera, para detenerlos con una barrera tipo GBE en la posición  $x=11$  m.

**PALABRAS CLAVES:** Caída de rocas, barrera tipo GBE, Software Rocfall

The objective of this study is to evaluate the rockfall risk of a slope located at the PK 82.3 of Route Q-45. The outcrop of 60 m height and 85° inclination, consists of materials from the Antuco volcano different eruptions and it presents a low competence, making it easily susceptible to erosion. Discontinuities were projected on the Schmidt Network in order to visualize the slope face placement. These discontinuities are due to the joints system formed in the columnar basalts and entail a high rockfall risk; with zones that are mildly meteorized at its walls as consequence of weather variabilities. The characterization was performed using the empirical method (RMR), which indicated a value of 65 for part (I) and of 62 for part (II). This means the rock mass is of a moderate good quality. Using the V.2 Rocfall software, simulations were done for pathways, kinetic energy and translation velocity. This enabled for the comparison of effects considering the varied groups of rocks and depending also on the weight and fall height. The results of this analysis revealed that 100% of the rocks will reach the road. The energy, the bounce height and the final velocity of the 20 t blocks lie in the ranges of 300 to 1500 kJ of 1,3 to 4 m and of 4 to 12 m/s, respectively. At the same time, the energy, the bounce height and the final velocity of the 1,6 t blocks lie in the ranges of 100 to 300 kJ of 0.7 to 4,5 m and of 7 to 27 m/s, respectively. Based on these results, the proposed protection measures consist of a curtain-type barrier that can direct eventual rockslides coming from the top of the slope towards its lower part, and hence stopping them with a GBE-type barrier placed in position  $x=11$  m.

**KEY WORDS:** Rockfall, GBE barrier, Software Rocfall

<sup>1</sup>Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil Geológica, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [rcontrerasu@ing.ucsc.cl](mailto:rcontrerasu@ing.ucsc.cl)

<sup>2</sup>Profesor Guía, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [rking@ucsc.cl](mailto:rking@ucsc.cl)

<sup>3</sup>Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [jmontenegro@ucsc.cl](mailto:jmontenegro@ucsc.cl)



## 1. INTRODUCCIÓN

La infraestructura vial y en especial las carreteras, son de significativa importancia en el crecimiento económico y social de un país. Debido a esto, Chile ha impulsado proyectos de planificación territorial que involucran el mejoramiento de rutas de acceso y pasos internacionales (MOP, 2016). Para los ingenieros esto genera diferentes dificultades al momento de diseñar carreteras ya que deben considerar condiciones climáticas adversas, subsuelos con composición desfavorable y pendientes abruptas a lo largo del camino. En este contexto, uno de los procesos que más daño generan a las infraestructuras y vidas humanas en estas superficies es la ocurrencia de procesos de remoción en masa, que se entiende como movimientos ladera abajo de rocas, suelos o una combinación de ambos (Cruden, 1991).

Según SERNAGEOMIN (2015), entre el período de 1980 y 2015 se han registrado alrededor de 133 procesos de remoción en masa, de los cuales algunos generaron consecuencias fatales, dejando un saldo de al menos 864 víctimas y grandes pérdidas económicas producto de la destrucción de casas y carreteras. Del registro total de procesos de remoción en masa, al menos 49 son deslizamientos y caídas de rocas, dejando un saldo de 61 víctimas fatales. Muchos de los desastres ocasionados por estos procesos de remoción en masa se podrían evitar si la normativa de diseño de carreteras fuera más estricta con aspectos como la inclinación de laderas y si además los ingenieros encargados de diseñar las laderas tomaran en cuenta los distintos factores que propician estas fallas; por ejemplo, los tipos de roca, sus discontinuidades, las condiciones meteorológicas, la sismicidad de la zona, etc. Por lo tanto, estos problemas requieren de un estudio eficaz que permita determinar lo que realmente ocurre con las rocas y/o suelos cuando estos fallan.

Debido a las catastróficas consecuencias de las fallas de laderas en roca, es que se han desarrollado distintos métodos de análisis para evaluar su estabilidad, según Basahel and Mitri (2017), estos pueden agruparse en cuatro categorías. Primero, **métodos de análisis cinemático**, que son utilizados para definir los mecanismos de falla, éstos pueden ser en cuña, plana o volcamiento, generalmente estos análisis se realizan mediante estereogramas y su uso se recomienda para laderas de pequeña escala como cortes en carretera o minas superficiales (Stead and Wolter, 2015). Segundo, **modelado numérico**, que de acuerdo a Basahel and Mitri (2017), tiene la particularidad que permite obtener información sobre la distribución de esfuerzos y desplazamientos en laderas. Tercero, método de **equilibrio límite**, el cual compara las fuerzas solicitantes con las fuerzas resistentes que actúan a lo largo de los planos de deslizamiento (Basahel and Mitri, 2017). Cuarto, **métodos de clasificación de macizo rocoso o métodos empíricos**, los cuales de acuerdo a (Pantelidis, 2009) permiten evaluar el comportamiento de laderas en roca considerando los parámetros más importantes que influyen en su estabilidad.

En esta investigación se presenta un importante caso de estabilidad de un macizo rocoso en la Ruta Q-45, este posee una zona afectada por desprendimientos de roca, específicamente en el km 82.3. Esta vía tiene importancia estratégica debido a que es el acceso principal al Volcán Antuco, mayor atracción turística del sector, y además es la conexión al paso Internacional Pichachén, el cual el año 2014 fue incorporado dentro de la lista de los 26 pasos priorizados entre Chile y Argentina (CITRA, 2017).

En esta ocasión para describir la calidad del macizo rocoso se aborda el método Rock Mass Rating (RMR) propuesto por (Bieniawski, 1989), junto con la proyección de las discontinuidades mediante la Red de Schmidt en el programa Dips v.5.1. y también se utiliza la versión académica del programa Rocfall V.2. producido por Rocscience, para simular la trayectoria de las caídas de rocas y evaluar si estas alcanzan la ruta ubicada al pie de la ladera. Además, el programa calcula la energía cinética, velocidad de traslación y altura de rebote de los diferentes grupos de rocas que caen a lo largo de la sección. Basado en los resultados se discuten las consecuencias, limitaciones y se recomiendan acciones para mitigar futuros problemas.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Ubicación zona de estudio

La zona de estudio se emplaza en la comuna de Antuco perteneciente a la región del Bío-Bío, esta se sitúa a 560 km al sur de Santiago, capital de Chile. El área de estudio se encuentra geográficamente a 82.3 km al este de Los Ángeles como se indica en la (Figura 1).

Este sector es uno de los destinos turísticos más importante de la región y el acceso principal es la Ruta Q-45 que permite el desplazamiento de residentes, trabajadores y turistas hacia la represa El Abanico, al Parque Nacional Laguna del Laja, al centro de ski Antuco y además al paso internacional a Argentina, Pichachén.

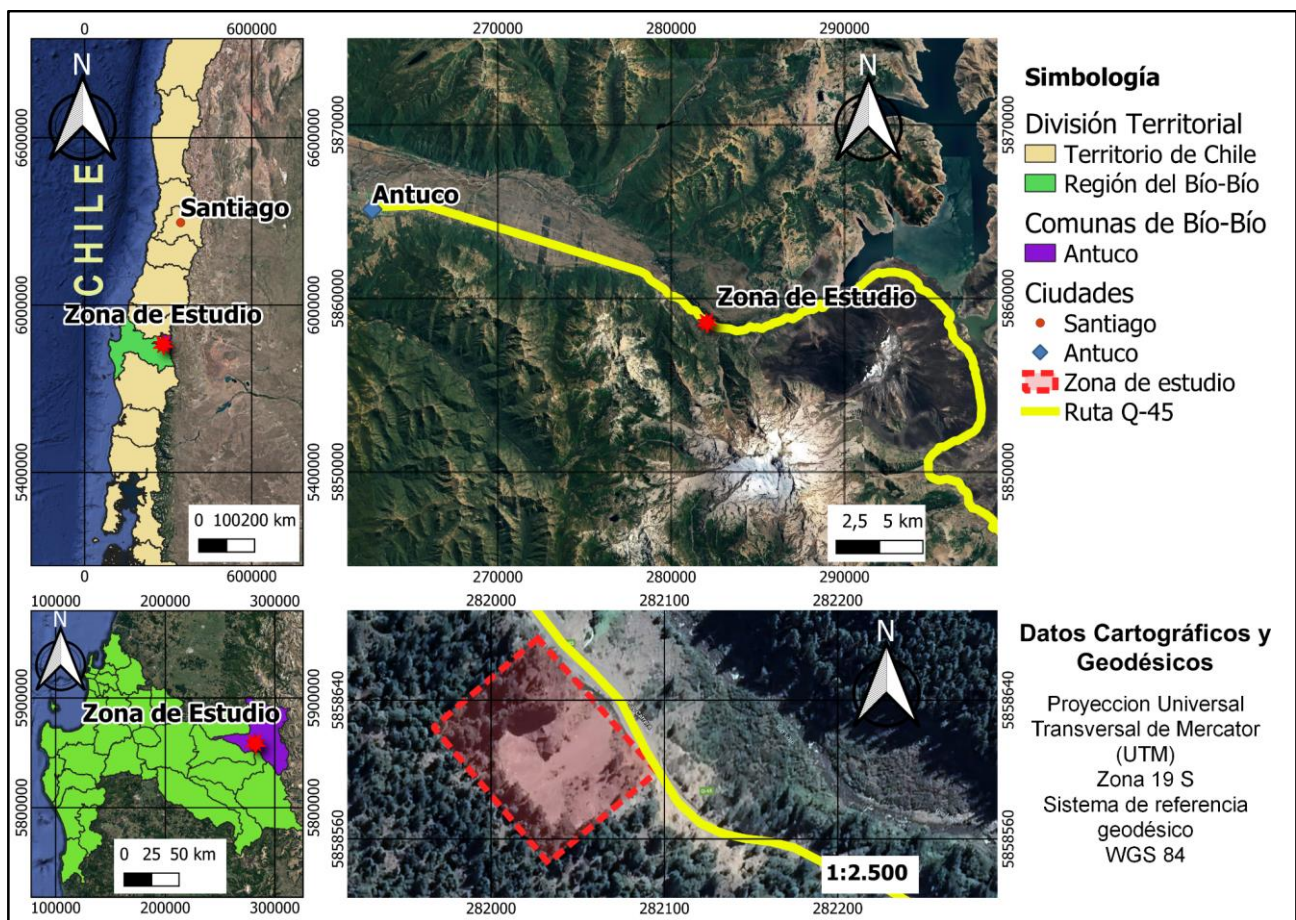
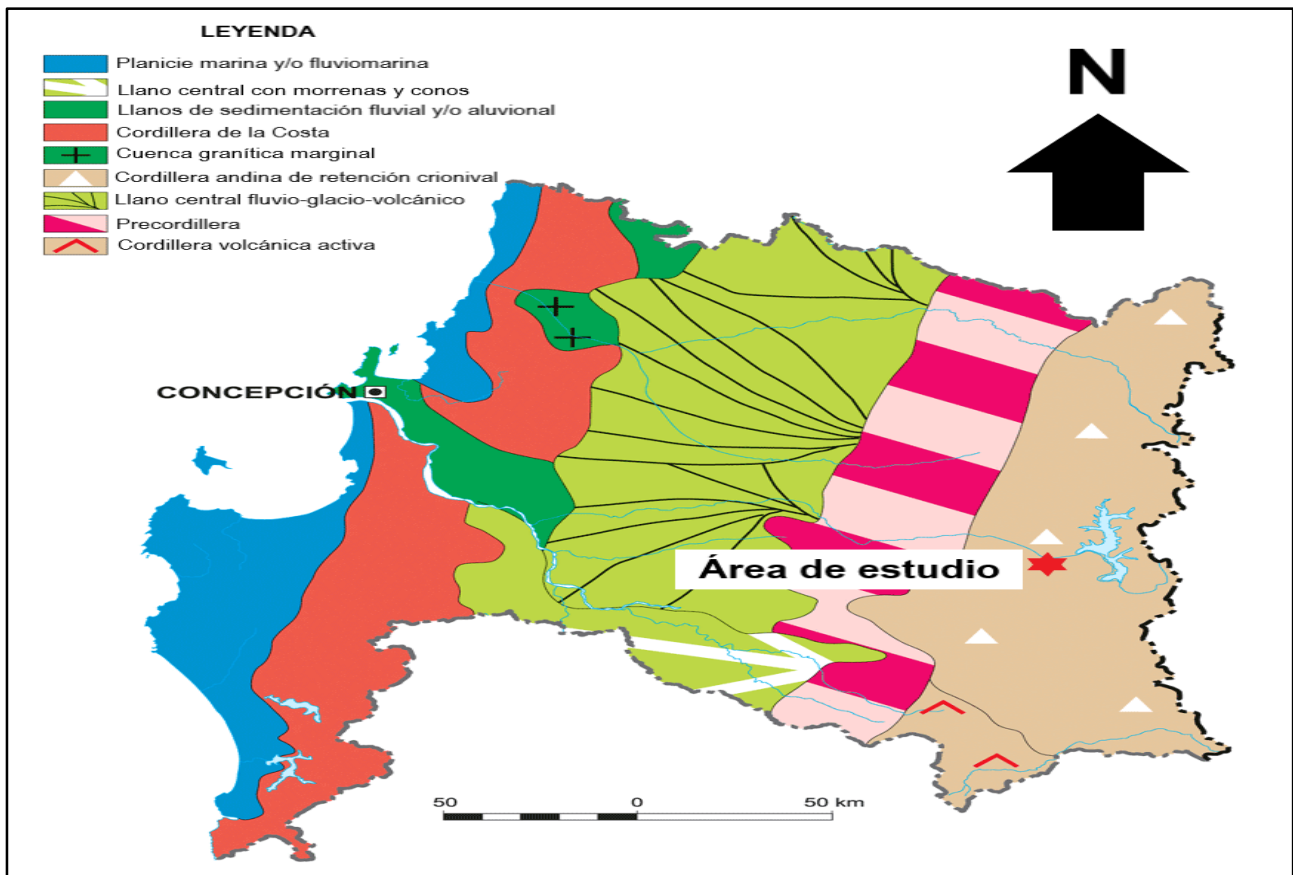


Figura 1.- Vista en planta de la zona de estudio. Modificado de Google Earth Pro v7.3.

### 2.2. Geomorfología

La mayoría del territorio chileno presenta una geomorfología muy variada conformada por 4 relieves principales, las Planicies Litorales, Cordillera de la Costa, Depresión Intermedia y Cordillera de los Andes. Estas macroformas son producto del régimen tectónico del Cinturón de Fuego, modelado por la acción de subducción de la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana. Así mismo la región del Bío-Bío está conformada por distintos relieves como se indica en la (Figura 2). El valle del Río Laja donde se encuentra el área de estudio por sus características pertenece al sector de cordillera andina de retención crionival (Börgel, 1983). A sus alrededores este valle limita con las unidades geomorfológicas de precordillera y el llano central fluvio-glacio-volcánico. A continuación, se resumen las características de las unidades geomorfológicas relacionadas con este estudio.



**Figura 2.-** Mapa geomorfológico de la región del Bío-Bío. (Modificado de IGM, 2005)

### 2.2.1. Cordillera andina de retención crionival

Comprende todo el sector de la Cordillera de los Andes constituido por rocas estratificadas y plutónicas que corresponden en su mayoría a brechas basálticas y andesíticas, riolitas y sedimentos clásticos y piroclásticos. Estas formaciones han sido modeladas por las glaciaciones y procesos tectónicos, que están ligados a la génesis de la Laguna del Laja (Moreno *et al.*, 1984). Según Thiele *et al.* (1998) en la actualidad es posible observar evidencias de materiales de avalanchas volcánicas, flujos laháricos y piroclásticos emitidos por la actividad del Volcán Antuco, gran parte de estos materiales fueron removidos por procesos fluviales de alta energía excavando profundamente el curso superior del valle del Río Laja.

### 2.2.2. Precordillera

El colapso del Volcán Antuco I generó una avalancha volcánica que descendió por el valle del Río Laja, embalsando la Laguna del Laja. Luego la ruptura de esta barrera, alisó la topografía y originó flujos de detritos formando mantos, entre los cuales es posible observar restos de la avalancha. Por otro lado, la erosión fluvial del Río Laja es la responsable de la excavación profunda del mismo valle y de la formación de distintos niveles de terrazas (Thiele *et al.*, 1998).

### 2.2.3. Llano central fluvio-glacio-volcánico

Se extiende desde la localidad de Abanico hasta ingresar a la Depresión Central de Chile en el piedemonte preandino cercano a las lomas del pueblo de Tucapel donde se produce la apertura del valle y los materiales volcanoclásticos que lo componen se distribuyen en forma de abanico (Thiele *et al.* 1998). A lo largo del valle se pueden observar en las terrazas, los depósitos de relleno que están asociados a la actividad del Volcán Antuco, y fue Brüggén (1942) quien las describió como "gran anfiteatro morrénico", constituido de material de gran espesor que contiene material coluvial y fluvial estratificado.

## 2.3. Geología

### 2.3.1. Geología regional

La geología del área, cuya distribución y nomenclatura estratigráfica se resume en la (Figura 3), abarca un rango de edad desde el Oligoceno al Presente. Distribuidas a lo largo del área de estudio, se encuentran las rocas terciarias, constituidas principalmente por litologías sedimentarias y volcano-sedimentarias, que junto con los cuerpos intrusivos miocenos, constituyen las rocas del basamento (Moreno *et al.*, 1984). En discordancia angular las sobreyace la Formación Cola de Zorro, constituida por productos de antiguos estratovolcanes del sector de edad Plio-Pleistocena. Posteriormente, el tramo superior de la cuenca del Laja, ha sido rellenado por productos volcánicos del Grupo Volcán Antuco – Sierra Velluda y conjuntamente modelado por procesos glacio-fluviales.

### 2.3.2. Geología área de estudio

#### 2.3.2.1. Unidades volcánicas (Qv)

Se encuentran formadas en su mayoría por coladas basálticas, andesíticas y andesítico-basálticas, de colores negro, gris y pardo-rojizo, intercaladas con brechas y escaso material piroclástico, que alcanzan espesores del orden de 1.000 m. La correlación de esta unidad con aparatos volcánicos similares de zonas adyacentes indica la intensa actividad volcánica cuaternaria de este sector (Niemeyer & Muñoz, 1983). Los volcanes Antuco (2979 m) y Sierra Velluda (3585 m) son estratovolcanes ubicados en el borde suroeste de la Laguna del Laja. Estos edificios volcánicos cuaternarios, que están emplazados en una depresión anular de 18 km de diámetro, presentan edades en sus bases de  $<124$  y  $495 \pm 88$  ka respectivamente (K-Ar/roca toral; Moreno *et al.*, 1984).

##### 2.3.2.1.1. Volcán Sierra Velluda (Qvsv)

Es un estratovolcán extinto, fuertemente erosionado, formado por flujos de lava y depósitos laháricos y piroclásticos (Moreno *et al.*, 1984). Las coladas de lava se extienden por más de 10 km desde el centro de emisión y, en parte, han sido excavadas por la acción glaciaria, dando origen a numerosos valles radiales al centro volcánico, además, producto de la erosión glaciaria estos valles serían ocupados por la Laguna del Laja. Lo anterior permite deducir una edad máxima pleistocena inferior para este volcán y que es la unidad volcánica más antigua del Complejo Volcánico Antuco-Sierra Velluda. (Varela *et al.*, 1988)

##### 2.3.2.1.2. Volcán Antuco (QvaI, QvaII)

El Volcán Antuco comprende dos etapas; un primer edificio (Antuco I), que culminó con un evento eruptivo freatomagmático, formando una caldera de 4 km de diámetro y una avalancha volcánica. Posteriormente, se formó un cono central al interior de la caldera, correspondiente al Antuco II (Lohmar, 2000).

###### 2.3.2.1.2.1. Volcán Antuco I (QvaI)

Volcán de composición basáltica a dacítica, que alcanzó más de 2000 m de altura, con un diámetro basal de 12 km. Se muestra con buena exposición en el Cerro Condor, siendo afectada por fallas y desplazamientos de bloques, esta unidad también aflora en la parte interior de la caldera y en el faldeo norte del Volcán Antuco actual. Según Varela *et al.* (1988) en Lohmar (2000) mediante dataciones K-Ar, la unidad Antuco I se habría desarrollado entre los 100.000 y 6.250 A.P

###### 2.3.2.1.2.2. Depósitos de avalancha volcánica del Volcán Antuco (Qava)

Con el colapso lateral del Antuco I, debido a la erupción freatomagmática, el cono quedó truncado hacia el oeste y con forma de herradura, se estima que el volumen del cono volcánico que habría colapsado, es superior a los 5 km<sup>3</sup>. Lohmar (2000), señala que la erupción estuvo acompañada por descargas de oleadas piroclásticas, extendiéndose dentro de la Depresión Central en forma de un gigantesco abanico. Por otro lado, Thiele *et al.* (1998), indica que este evento represó la antigua Laguna del Laja, elevando su nivel 100 metros y extendiéndose hasta los valles del Paso Pichachén. Posteriormente, la ruptura de este represamiento provocó un fenómeno avenidal, el cual erosionó parcialmente los depósitos de la avalancha (Varela *et al.*, 1988).

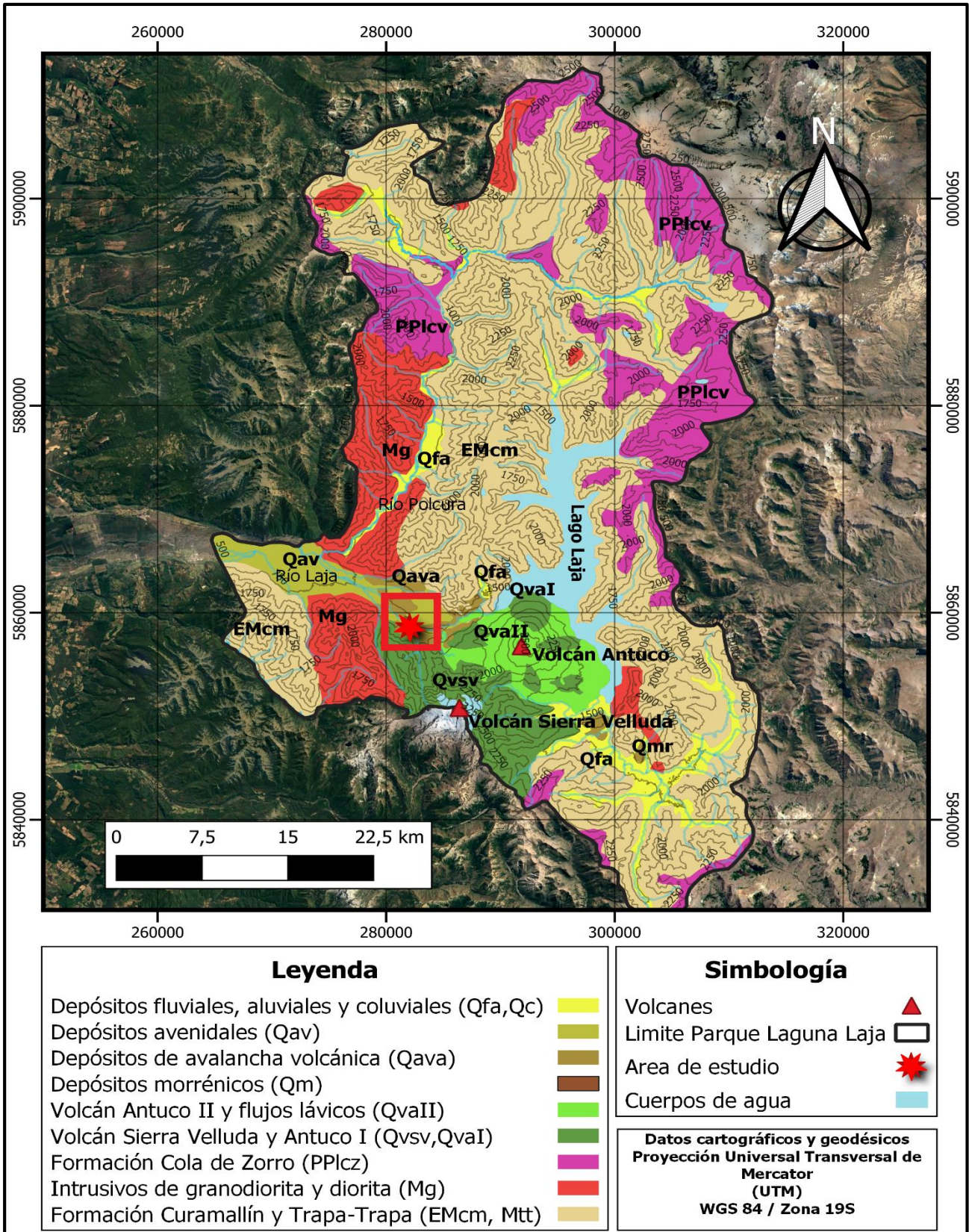


Figura 3.- Mapa geológico del área de estudio. Modificado de Niemeyer y Muñoz, 1983.

#### 2.3.2.1.2.3. Volcán Antuco II (QvaII)

Luego de la fase catastrófica, el Antuco II se empezó a edificar dentro de la caldera, generando el cono actual de composición basáltico a andesítico-basáltico. Esta unidad se compone de lavas, flujos de detritos, lahares y flujos piroclásticos que se han derramado preferentemente hacia el oeste, formando un cono casi perfecto de casi 1.000 m de altura sobre la base del anfiteatro con varios centros adventicios menores. Estos flujos de lava afloran además en el centro de ski Antuco, Salto Trubunleo, Salto Las Chilcas, entre otros. En cuanto a los flujos de lava generados en la segunda etapa del Antuco, estos represaron el Río Laja, formando la actual Laguna del Laja (Urrutia, 2018).

#### 2.3.2.2. Depósitos no consolidados (Qs)

##### 2.3.2.2.1. Depósitos morrénicos antiguos (Qma)

Corresponden a gruesos apilamientos de sedimentos con fragmentos desde 1 cm hasta bloques de 4 m, los que varían desde angulosos hasta subredondeados. Las morrenas están compuestas por lavas andesíticas, con cantidades menores de lavas andesítico basálticas y brechas volcánicas, provenientes de la Sierra Velluda y algunos clastos de granitoides, lavas y tobas con cristales de granate de la Formación Curamallín (Lohmar, 2000). Niemeyer & Muñoz (1983), reconocen debido a su extensión y asociación a una morfología caracterizada por amplios y profundos valles glaciales que estos depósitos de relleno corresponderían a los más antiguos reconocidos en el área.

##### 2.3.2.2.2. Depósitos avenidales (Qav)

Depósitos que forman parte importante del sustrato de la planicie, se muestran, en forma de montículos, cordones semi-anegados y cerros importantes. Se constituyen por un agrupamiento de fragmentos subredondeados a subangulosos de tamaños variables, desde 1 cm a 1 m de diámetro y con algunos bloques de 2 a 3 metros de diámetro. La composición de los clastos es principalmente andesítico-basáltica y la matriz es tamaño arena, de color negro y sin contenido de ceniza (Varela *et al.*, 1988). La edad de estos depósitos avenidales sería inmediatamente posterior a la formación de los depósitos de avalancha volcánica, por lo que son posteriores a  $6.25 \pm 0.06$  ka A.P (Lohmar, 2000).

##### 2.3.2.2.3. Depósitos morrénicos recientes (Qmr)

Se encuentran asociados a lenguas glaciares actuales que bajan desde el cono superior del Volcán Antuco o las laderas de la Sierra Velluda. Corresponde a depósitos diamícticos, consistentes en agregados polimícticos de clastos con tamaños variables y formas subangulosas a subredondeadas. Se habrían formado durante avances glaciares del periodo Holoceno (Varela *et al.*, 1988).

##### 2.3.2.2.4. Depósitos fluviales y aluviales (Qfa)

Esta unidad está constituida por sedimentos transportados y depositados por sistemas de agua y en menor medida procesos gravitacionales. Los sedimentos que constituyen las terrazas fluviales corresponden a gravas y ripios arenosos, en los cuales se intercalan algunos niveles arenosos de grano grueso a medio. Según Varela *et al.* (1988), la edad estimada para estos depósitos es de holocénica media a superior.

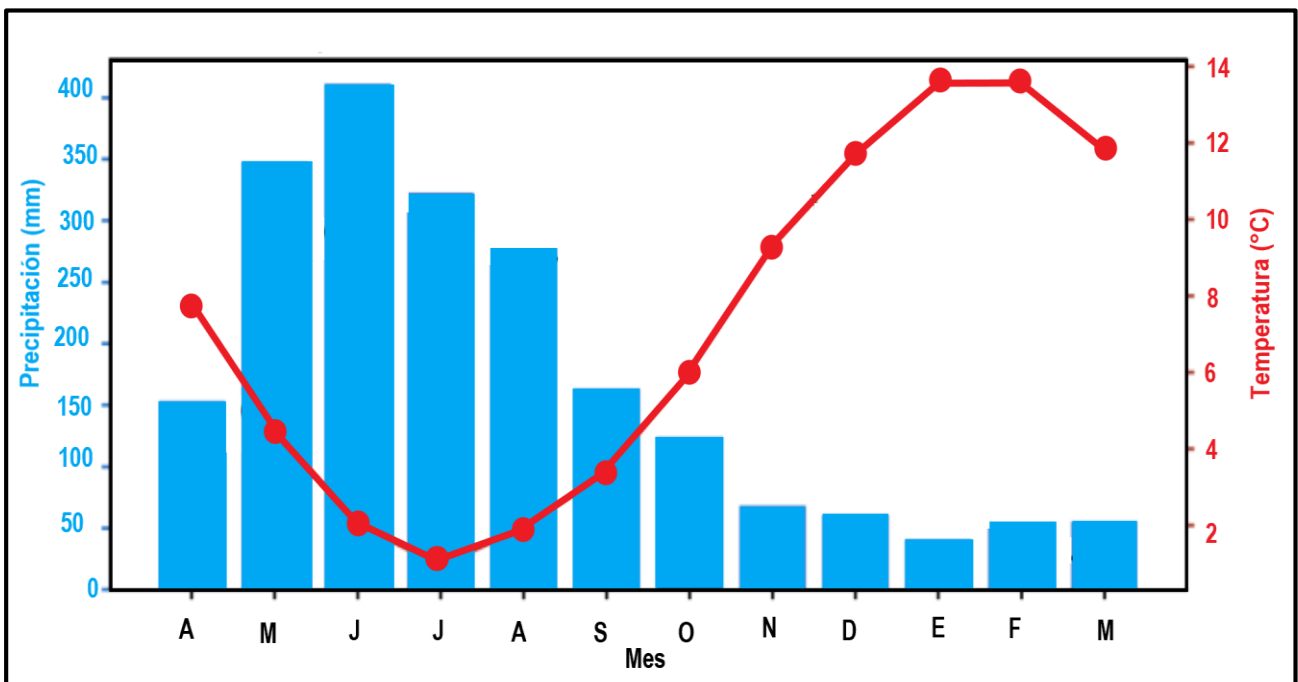
##### 2.3.2.2.5. Depósitos coluviales (Qc)

Estos depósitos se desarrollan en gruesas coberturas, alcanzando espesores de algunas decenas de metros a los pies de los faldeos existentes, los que constituyen un sustrato favorable para el crecimiento de bosques. Poseen una matriz arenosa-arcillosa y con mala selección. Estos depósitos se habrían generado por caídas gravitacionales de materiales sueltos o meteorizados a partir de la acción del agua, proveniente de lluvias o deshielos en laderas de fuerte pendiente. La edad atribuida corresponde al Holoceno (Lohmar, 2000).



### 2.4. Clima

Según Romero (1985), el sector del Volcán Antuco tiene un clima de tipo mediterráneo. Específicamente, el valle del Río Laja presenta 6 meses templados y secos y 6 meses fríos y húmedos. En el Parque Nacional Laguna del Laja como indica la (Figura 4) se registran abundantes precipitaciones, alcanzando sobre los 2.000 mm anuales y una temperatura media anual de 7°C (Comisión Nacional de Energía, 2020). Los mecanismos climáticos están determinados por la acción del anticiclón del Pacífico, el cual influencia la sequía estival y el invierno húmedo. Acercándose a la zona de estudio, la Cordillera de los Andes amplifica la influencia zonal de los sistemas frontales originando pisos bioclimáticos, que se tornan más húmedos y fríos a medida que aumenta la altura (IGM, 2001). En efecto, el Volcán Antuco tiene su límite de neviza a los 2.700 m y la Sierra Velluda a los 2.600 m, ambos con presencia de glaciares en sus laderas (Lohmar, 2000).



**Figura 4.-** Valor mensual de precipitación y temperatura de la Laguna del Laja. (Modificado de CNE, 2020)

### 2.5. Procesos de remoción en masa

Una remoción en masa es un movimiento descendente por efectos de la gravedad de un volumen de material constituido por roca, suelo o ambos (Cruden, 1991). Estas comprenden distintos tipos de eventos donde varían tanto el material involucrado como el mecanismo de desplazamiento. Varnes (1978) ha desarrollado una clasificación basada en la naturaleza del material involucrado y el tipo de movimiento (Tabla 1).

**Tabla 1:** Clasificación de deslizamientos (Modificado de Varnes, 1978).

| Tipo de movimiento         |      | Tipo de material                    |                                  |
|----------------------------|------|-------------------------------------|----------------------------------|
| Caída                      |      |                                     |                                  |
| Volcamiento                |      |                                     |                                  |
| Deslizamiento Rotacional   | Roca |                                     | Suelo                            |
| Deslizamiento Traslacional |      |                                     |                                  |
| Extensiones laterales      |      | Grano grueso                        | Grano fino                       |
| Flujos                     |      | (detritos, <80%<br>partículas <2mm) | (barro, >80%<br>partículas <2mm) |
| Complejos                  |      |                                     |                                  |

### 3. METODOLOGÍA

La metodología de este estudio se dividió en 3 etapas principales, primero partió por una recopilación de datos de la zona de estudio. En segundo lugar, se visitó el terreno para explorar y describir el macizo rocoso siguiendo las sugerencias de la norma ISRM (1978). Finalmente se realizó un procesamiento de la información recopilada, para evaluar el riesgo de caída de rocas mediante simulaciones en el software Rocfall V.2.

#### 3.1. Trabajo de gabinete

El trabajo de gabinete consistió en recopilar material bibliográfico de la geología, geomorfología, clima y antecedentes históricos de caídas de rocas en el sector. Se definieron los límites del área de estudio, los materiales necesarios y, además, se observaron imágenes satelitales para preparar la campaña de terreno y conocer las vías de acceso.

#### 3.2. Trabajo en terreno

El trabajo en terreno constó de 2 visitas a la zona de estudio, la primera a modo de observar los factores condicionantes y obtener el diseño geométrico de la ladera mediante un levantamiento topográfico realizado con una estación total Focus 8 (Figura 5.A y 5.B). En la segunda visita, se midieron las orientaciones de las familias de discontinuidades con una brújula Brunton y se determinaron los parámetros necesarios para medir la calidad del macizo rocoso, mediante el método RMR de Bieniawski (1989), como indica la (Figura 5.C).



**Figura 5.-** A.B) Trabajo en terreno de la estación total para obtener topografía de la ladera en la primera visita. C) Obtención de los parámetros de las discontinuidades para calcular el Índice RMR en la segunda visita.

#### 3.3. Trabajo de laboratorio

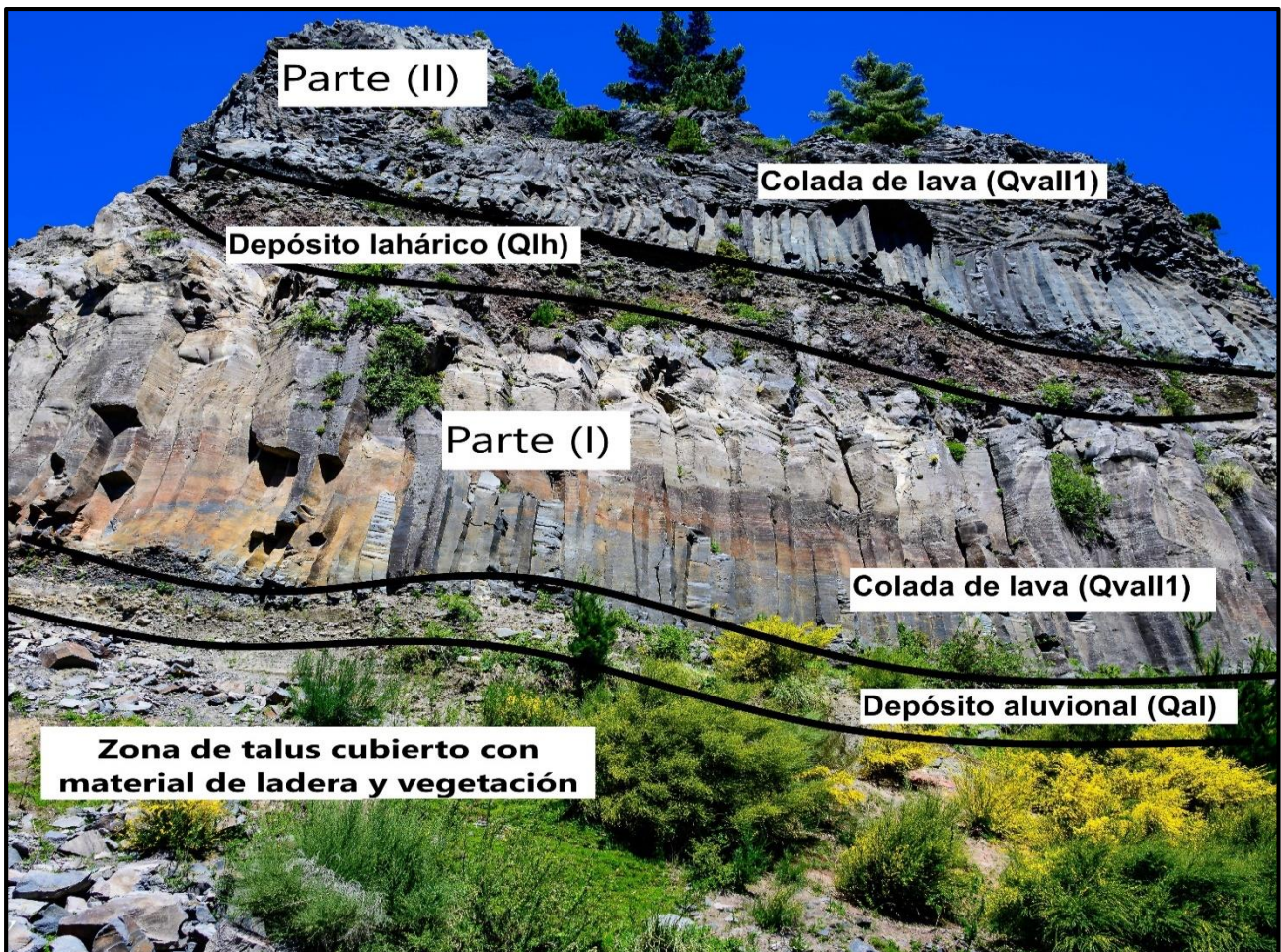
En el trabajo de laboratorio se realizó un procesamiento de los datos reunidos en terreno, se determinó la calidad del macizo rocoso utilizando el método RMR. Las orientaciones de las familias de discontinuidades se proyectaron en la Red de Schmidt, interpretando la disposición de estas en relación a la cara de la ladera mediante el software Dips v.5.1. Finalmente, las trayectorias que siguen los bloques se simularon usando la versión académica del software Rocfall V.2., producido por Rocscience, del cual se obtuvieron los gráficos de ubicación horizontal, energía cinética, velocidad de traslación y altura de rebote. Además, se generó una simulación específica de los valores que toman las rocas en la posición  $X=11$  m, para recomendar medidas de protección y así mitigar los futuros riesgos de desprendimientos de rocas.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Caracterización geológica

Como resultado del trabajo de gabinete se logró comprender la composición de la ladera y las estructuras geológicas presentes, las cuales fueron corroboradas en terreno. El basamento de esta secuencia está formado por la avalancha volcánica (Qav), producto del colapso del Volcán Antuco I. Sobre esta se depositan las oleadas piroclásticas (Qop) y rípios aluviales (Qal) (Figura 6). Luego, afloran los flujos más antiguos del estratovolcán moderno como 2 coladas superpuestas de espesores estimados en 15 a 20 m cada una (Figura 6). La ladera fue dividida en dos partes, la parte (I) para el sector al cual se le pudieron tomar mediciones y parte (II) para el sector al cual se tuvo que interpretar sus mediciones aproximadas debido al nulo acceso. Estas lavas andesítico-basálticas presentan estructura columnar y están divididas en 2 por un depósito lahárico (Qlh) de clastos subangulosos a subredondeados (Figura 6). Toda la secuencia fue excavada por la erosión fluvial del Río Laja, debido a la baja competencia del sustrato.

La base de la ladera (zona de talus) está cubierta de material causado por los desprendimientos de rocas y vegetación, llegando hasta la orilla de la carretera con una inclinación de 40°. La fracturación y erosión actúa principalmente en la zona externa del macizo rocoso, esto se debe a los sistemas de juntas que se forman en los basaltos columnares cuando se enfría el magma, creando vías que dan inicio al desprendimiento de rocas.



**Figura 6.**-Vista de la ladera estudiada. Zona de talus cubiertos con material de la ladera y vegetación, debajo de las primeras coladas de lavas emitidas por el Antuco II (QvaIII). Bajo estas, se observa un depósito aluvional (Qal). Las coladas parte (I) y (II), están separadas por un depósito de origen lahárico (Qlh).

Las discontinuidades en la ladera presentan flujos de agua en épocas invernales debido a las intensas lluvias. Además, al pie de la ladera escurren infiltraciones de agua visibles todo el año, de una antigua cascada que se ubica al costado este de la ladera (Figura 7).



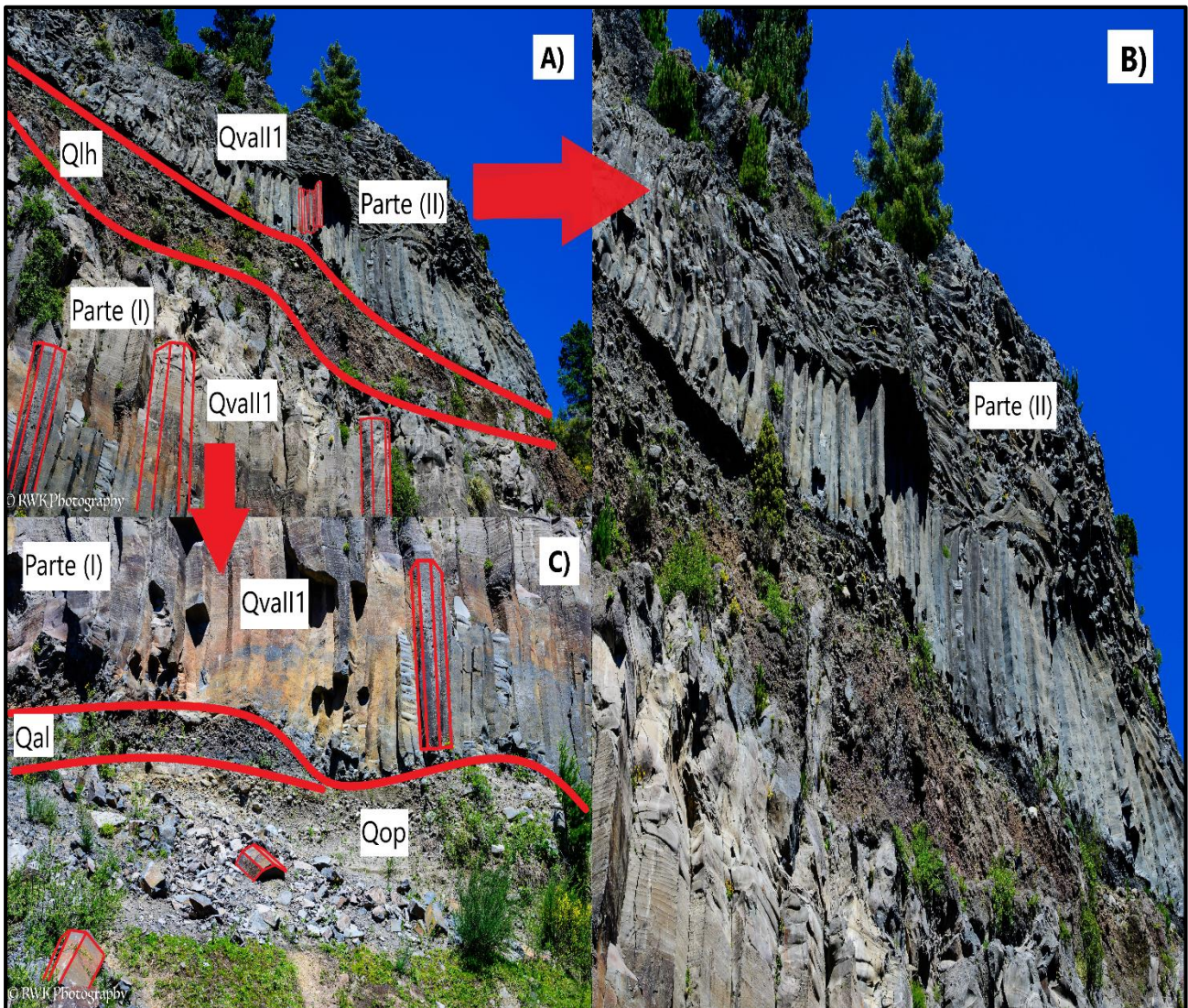
**Figura 7.**-Presencia de agua al costado este de la ladera de una antigua cascada y acumulación de bloques caídos en la zona de talus que además caen a la carretera.

## 4.2. Caracterización geotécnica

### 4.2.1 Descripción del macizo rocoso

La altura de la ladera es de 60 m y tiene una pendiente de  $85^\circ$ , por lo general, el macizo rocoso presenta conjuntos de discontinuidades que muestran 3 direcciones preferentes debido a la estructura columnar de los basaltos formando bloques hexagonales regulares (Figura 8). Aunque las juntas son estrechas, los bloques superficiales muestran mayores aberturas formadas por la alta tasa de lluvia, congelación y descongelación en las épocas invernales. Además, las paredes superficiales están ligeramente meteorizadas y muestran signos de manchas color pardo (Figura 8).

Los basaltos tienen una alta resistencia a la compresión simple que oscila entre 59 a 343 MPa, como propone (González de Vallejo, 2002). En la investigación realizada en terreno no se logró medir la resistencia de la ladera con el martillo Schmidt, por lo tanto, se tomó el valor medio de la literatura mencionada anteriormente. El valor de RQD para la parte (I) es de 98% y para la parte (II) es de 92%, estos valores fueron calculados según la cantidad de juntas en  $1 \text{ m}^3$ , por lo que el índice RQD del macizo rocoso es de calidad buena. Los parámetros para la parte (II) debido al difícil acceso, se estimaron con las fotos tomadas en terreno (Figura 8.B). En la parte (I) el macizo rocoso presenta un espaciado entre discontinuidades que varía entre 0.6 y 1 m (Figura 8.C). En la parte (II), los valores de espaciado son entre 0.3 y 0.4 m.



**Figura 8.-** Variación de los parámetros del Índice RMR en las coladas de lava (QvaII1) separadas por un depósito lahárico (Qlh). Se observan los diferentes espaciamientos de las discontinuidades de la parte (I) y (II) (Figura 8.A). Naturaleza de las diaclasas: apertura, continuidad, rugosidad y relleno (Figura 8.B y 8.C).

En relación a las propiedades de las discontinuidades, la mayoría de las juntas no presenta rellenos a excepción de algunas que presentan vegetación en la parte (I), bajo la unidad de depósitos laháricos (Qlh) y en la parte (II) en la corona de la ladera, estas se pueden ver en la (Figura 8.B). La apertura entre paredes para la parte (I) es abierta y varía entre 5 a 40 mm, la persistencia de las diaclasas en la dirección del manto se mantiene entre un rango medio de 3 a 4 metros y en dirección perpendicular a la cara de la ladera se estima entre 0.60 a 1 m. Para la parte (II) la apertura entre paredes es moderadamente abierta y se estima entre 3 a 10 mm, la persistencia de las diaclasas en la dirección del manto se mantiene entre un rango de 1 a 2 metros y en dirección perpendicular a la cara de la ladera se estima entre 0.30 a 0.40 m (Figura 8.B). La rugosidad para la parte (I) y (I) es suave, por lo que se considera baja. Los valores de los parámetros y del Índice RMR para ambas partes de la ladera se presentan en la (Tabla 2).

**Tabla 2:** Parámetros del Índice RMR en las partes (I) y (II) de la ladera estudiada.

|   | Parámetro                           | Categoría        | Parte (I) | Valor RMR | Parte (II) | Valor RMR |
|---|-------------------------------------|------------------|-----------|-----------|------------|-----------|
| 1 | Resistencia (MPa)                   |                  | 201       | 15        | 201        | 15        |
| 2 | R.Q.D. (%)                          |                  | 98        | 19        | 92         | 18        |
| 3 | Espaciado (m)                       |                  | 0.6 - 1   | 12        | 0.3 - 0.4  | 8         |
| 4 | Propiedades de las discontinuidades | Apertura (mm)    | 5 - 40    | 0         | 3 - 10     | 0         |
|   |                                     | Persistencia (m) | 3 - 4     | 2         | 1 - 2      | 4         |
|   |                                     | Rugosidad        | Suave     | 1         | Suave      | 1         |
|   |                                     | Relleno          | Ninguno   | 6         | Ninguno    | 6         |
|   |                                     | Meteorización    | Moderada  | 3         | Moderada   | 3         |
| 5 | Presencia de agua                   |                  | Húmedo    | 7         | Húmedo     | 7         |
|   | Índice RMR                          |                  |           | 65        |            | 62        |

Según el sistema de descripción de Bieniawski (1989), el valor Índice RMR para la parte (I) y (II) es 65 y 62 respectivamente, esto indica que la calidad del macizo rocoso es relativamente buena, lo cual representa un factor de riesgo medio. A pesar que el método RMR se utiliza para clasificar la calidad de macizos rocosos en túneles, en este estudio se aplicó para describir la calidad del macizo rocoso en la ladera.

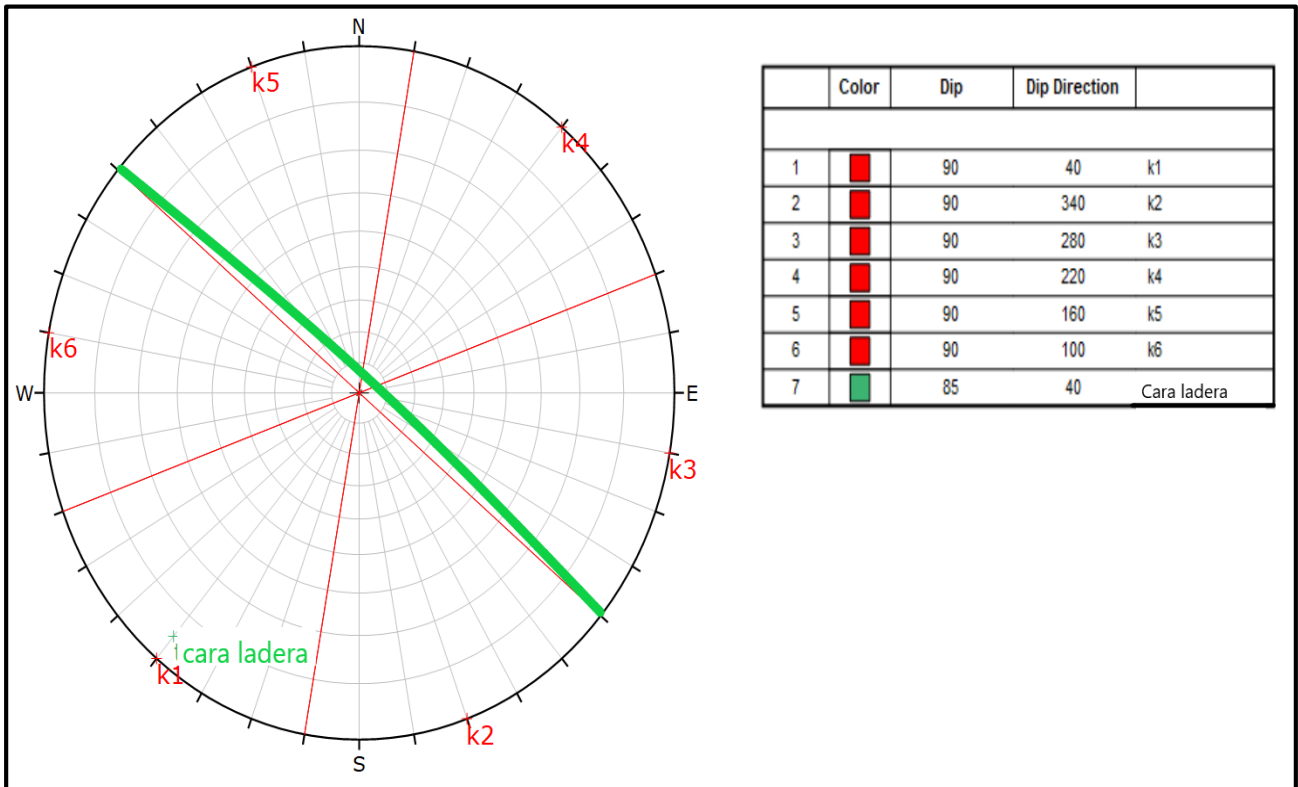
#### 4.2.2. Proyección estereográfica

Las caídas se asocian a la presencia de columnas de roca en voladizo, es decir, sin apoyo producto de la erosión selectiva que ocurre entre los estratos de la ladera. El buzamiento que presentan las familias de discontinuidades (k1, k2, k3, k4, k5 y k6) es de 90°. Además, la cara de la ladera presenta una pendiente de 85° y una dirección paralela a la familia k1 y k4, generando un estado crítico para los bloques que están sueltos. Las condiciones inestables son más abundantes en la parte (II) del macizo rocoso, donde los bloques presentan menor espaciado entre familias de discontinuidades. Cabe destacar que las mediciones de las discontinuidades recogidas en terreno solo corresponden a la cara de la ladera y a la familia k1, las otras 5 direcciones de las familias se asumen haciendo un supuesto de la forma hexagonal regular que presentan los bloques de basalto columnar. Los valores de las discontinuidades se indican en la (Tabla 3).

**Tabla 3:** Datos de orientación de las discontinuidades, presentando manto y dirección de manto.

| Estación  | Cara de ladera |         | Familia discontinuidades |         |     |         |     |         |     |         |     |         |     |         |
|-----------|----------------|---------|--------------------------|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|
|           |                |         | k1                       |         | k2  |         | k3  |         | k4  |         | k5  |         | k6  |         |
| Ruta Q-45 | Dip            | Dip dir | Dip                      | Dip dir | Dip | Dip dir | Dip | Dip dir | Dip | Dip dir | Dip | Dip dir | Dip | Dip dir |
| Km 82.3   | 85°            | 40°     | 90°                      | 40°     | 90° | 340°    | 90° | 280°    | 90° | 220°    | 90° | 160°    | 90° | 100°    |

En la (Figura 9) se representan en líneas de color rojo, las orientaciones de los planos que forman las familias de discontinuidades y los polos con sus indicadores (k1, k2, k3, k4, k5, k6). La línea de color verde, representa la orientación de la cara de la ladera y su polo.



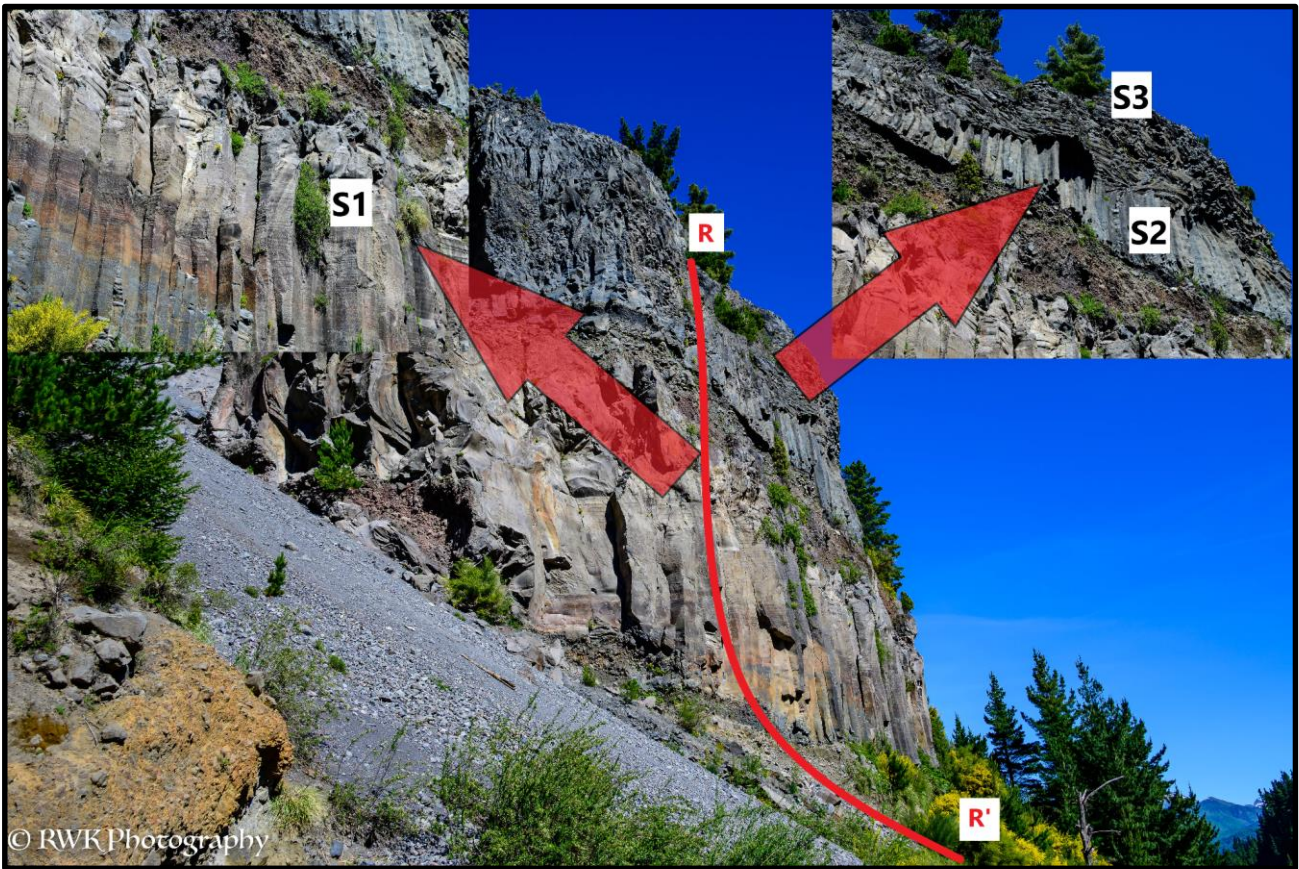
**Figura 9.-** Representación de orientaciones de las principales discontinuidades y de la cara de la ladera en la Red de Schmidt. Elaboración propia.

### 4.3. Simulación de caída de rocas

El comportamiento y la caracterización de la trayectoria de las caídas de rocas se ha simulado mediante la versión académica del software Rocfall V.2., producido por Rocscience. El programa requiere 3 parámetros de entrada que son: el diseño geométrico de la ladera con sus fuentes de desprendimiento, las características geométricas de cada grupo de rocas y los valores del coeficiente de restitución de cada unidad que compone la ladera y las obras ingenieriles presentes.

#### 4.3.1. Diseño geométrico de la ladera

En la visita a terreno, observando los lugares desde donde provienen las caídas de rocas, se ha considerado que los desprendimientos caen desde 3 fuentes puntuales (S1, S2 y S3), como se observa en la (Figura 10). La altura media de caída de la fuente de desprendimiento (S1) corresponde a 26 m y las fuentes de desprendimientos (S2) y (S3) tienen una altura media de caída de 46 m y 56 m, respectivamente. A cada fuente de desprendimiento de rocas se le ha asignado 500 bloques, por lo tanto, se simularon un total de 1500 caídas.



**Figura 10.-** Vista de la sección R-R' en terreno con las distintas fuentes puntuales de caída de rocas y tamaños de las columnas.

El perfil transversal de la sección R-R' se generó con el programa Autocad Civil 3D de esta manera se obtuvo el diseño geométrico de la ladera, el cual consta de 3 secciones y se presentan en la (Figura 11). La primera sección corresponde al macizo rocoso, desde los 0 a los 7 m horizontales, este se compone por roca basáltica de alta resistencia, presentando una pendiente de 85° donde los bloques provenientes de (S2) y (S3) experimentan rebotes en la pendiente y los de (S1) sufren caída libre hasta la parte baja de la ladera. La segunda sección corresponde a la zona de talus, esta comienza desde los 7 m y termina en los 25 m horizontales, se constituye por acumulación de rocas desprendidas desde la ladera y vegetación. En este sector la pendiente baja a 40° y el mecanismo de movimiento que siguen los bloques consiste principalmente en rebotes y rodaduras. La tercera sección corresponde al camino de ripio, este comienza en los 25 m y termina a los 29 m horizontales, este sector presenta una pendiente de 0° y se acumulan las rocas en su totalidad.

**4.3.2. Coeficiente de restitución**

Los valores del coeficiente de restitución normal y tangencial se han tomado de la literatura proporcionada por Rocscience para los distintos sustratos que componen la ladera y la calzada, los utilizados en este estudio se encuentran en la (Tabla 4).

**Tabla 4:** Valores del coeficiente de restitución extraído de la literatura proporcionada por Rocscience.

| Parámetros             | Afloramiento de roca | Talus con vegetación | Camino de ripio |
|------------------------|----------------------|----------------------|-----------------|
| Restitución normal     | 0.45                 | 0.32                 | 0.35            |
| Restitución tangencial | 0.85                 | 0.80                 | 0.85            |

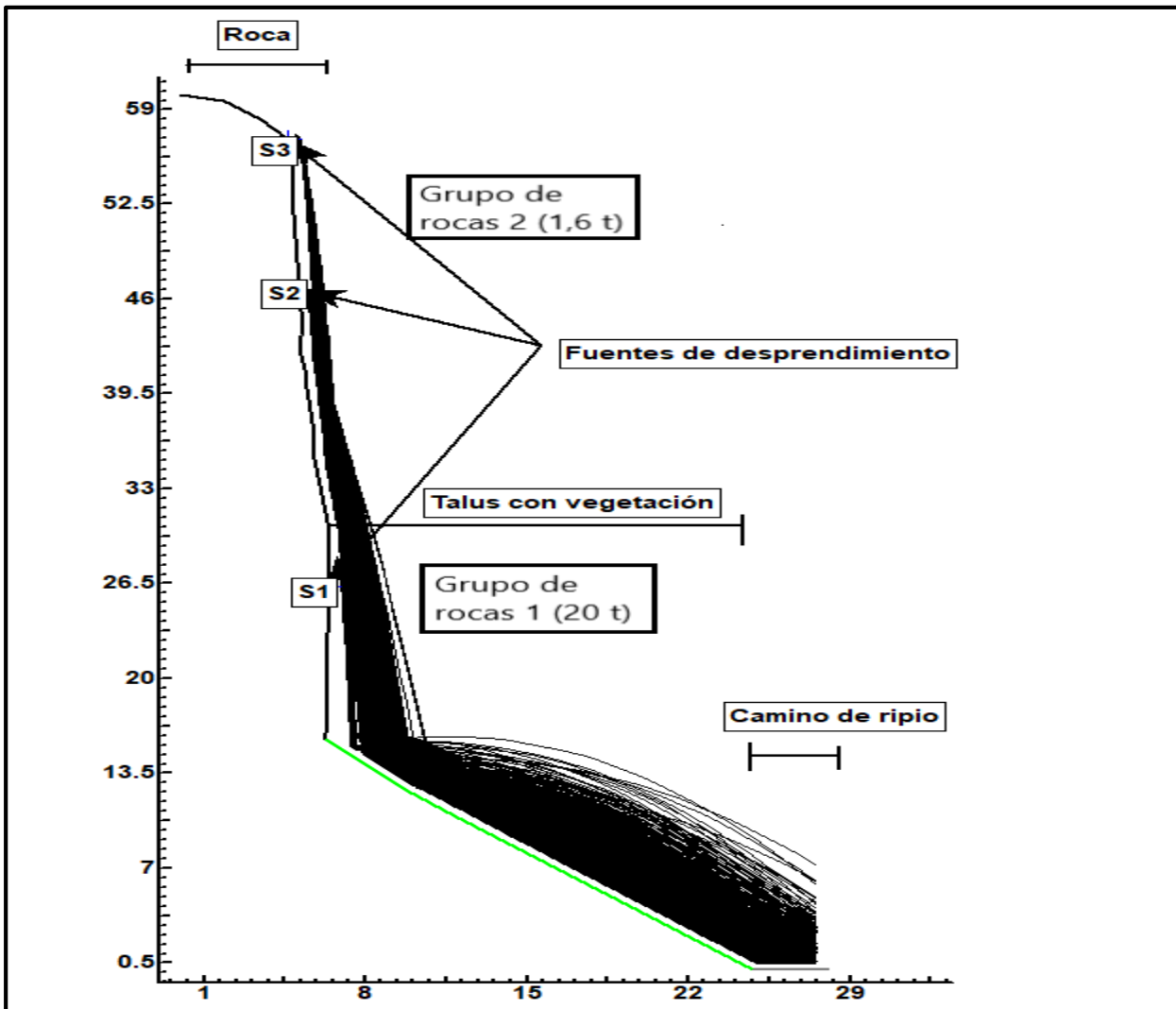


Figura 11.- Sección R-R' con la trayectoria de los bloques caídos generado por el programa Rocfall.

#### 4.3.3. Propiedades geométricas de las rocas

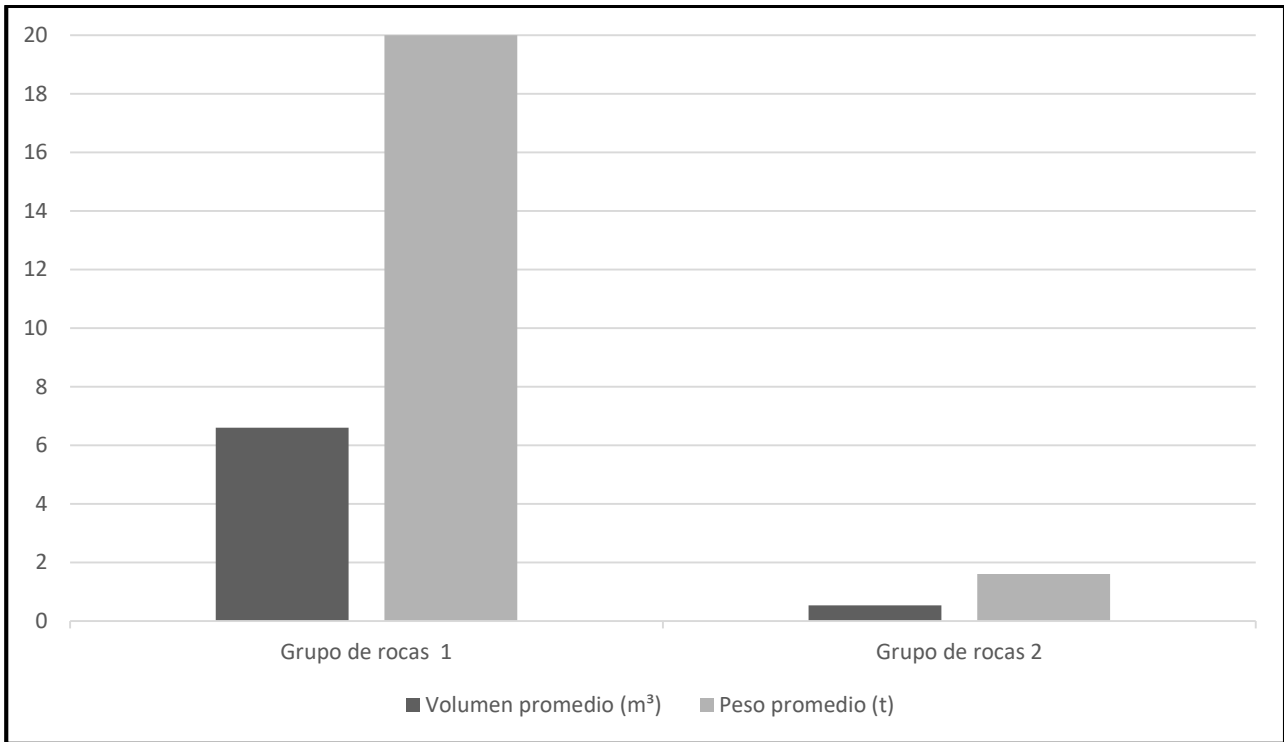
El tamaño de los bloques se obtuvo asumiendo que los basaltos columnares que componen el macizo, tienen una forma hexagonal y regular en todos sus lados, de esta manera, el volumen se calculó con una fórmula tradicional de volumen para primas hexagonales. Donde la distancia entre discontinuidades adyacentes o espaciado representa el lado (L) de un hexágono y la persistencia de las discontinuidades en dirección del manto del macizo rocoso representa la altura (h) del hexágono.

$$V = 3 * L * ap * h \quad (1)$$

Donde: L= longitud del lado; ap= apotema; h= altura

Los pesos de los bloques se obtuvieron de la multiplicación del volumen con el respectivo peso específico de los basaltos, equivalente a 2800 kg/m<sup>3</sup>, según González de Vallejo (2002).

Los valores de volumen promedio y peso promedio de los grupos de roca 1 y grupo de roca 2 se representan de mejor manera en la gráfica de la (Figura 12). Los bloques del grupo de rocas 1 tienen un volumen promedio de 6.5 m<sup>3</sup>, por lo tanto, resultan tener un peso promedio de 20 t. Los bloques del grupo de rocas 2 tienen un volumen promedio de 0.5 m<sup>3</sup>, por lo tanto, resultan tener un peso promedio de 1.6 t.



**Figura 12.-** Variación del volumen promedio y peso promedio del grupo de roca 1 y grupo de roca 2.

Como se mencionó anteriormente existen 3 fuentes de desprendimiento, de las cuales se generan caídas de distintos grupos de roca. Para este análisis se calcula que 500 rocas del grupo 1 caen desde la fuente (S1), 500 rocas del grupo 2 caen desde la fuente (S2) y 500 rocas del grupo 2 caen desde la fuente (S3). En la (Tabla 5) se presenta un resumen de los parámetros de los grupos de rocas.

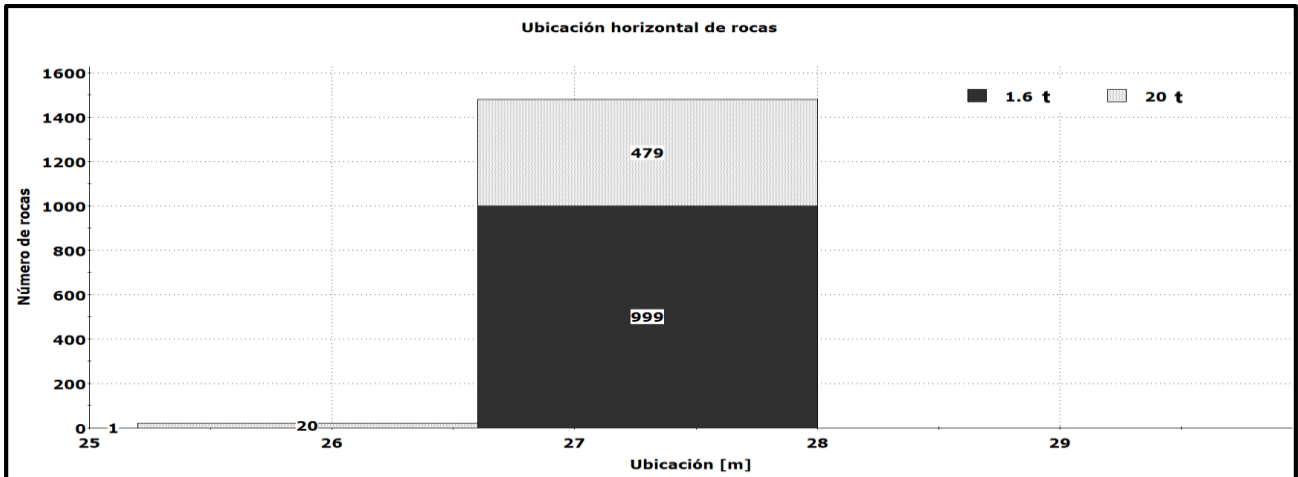
**Tabla 5:** Parámetros de los diferentes grupos de roca analizados en el software, Rocfall V.2.

| Parámetros                | Grupo de Roca |           |
|---------------------------|---------------|-----------|
|                           | 1             | 2         |
| Peso (t)                  | 20            | 1.6       |
| Fuente de desprendimiento | S1            | S2 y S3   |
| Peso específico (kg/m³)   | 2800          | 2800      |
| Forma                     | hexagonal     | hexagonal |
| Cantidad                  | 500           | 500       |

**4.3.4. Análisis de caída de rocas**

El análisis de la caída de rocas proporciona resultados en términos de cantidades como la distancia de desplazamiento horizontal, la altura de los rebotes sobre la pendiente, la velocidad de traslación y la energía cinética. En este sentido luego de obtener los parámetros de entrada necesarios mediante los trabajos en terreno y los cálculos realizados, se logró definir de manera aproximada el área de deposición y la trayectoria de los bloques de rocas a lo largo de toda la sección R-R’.

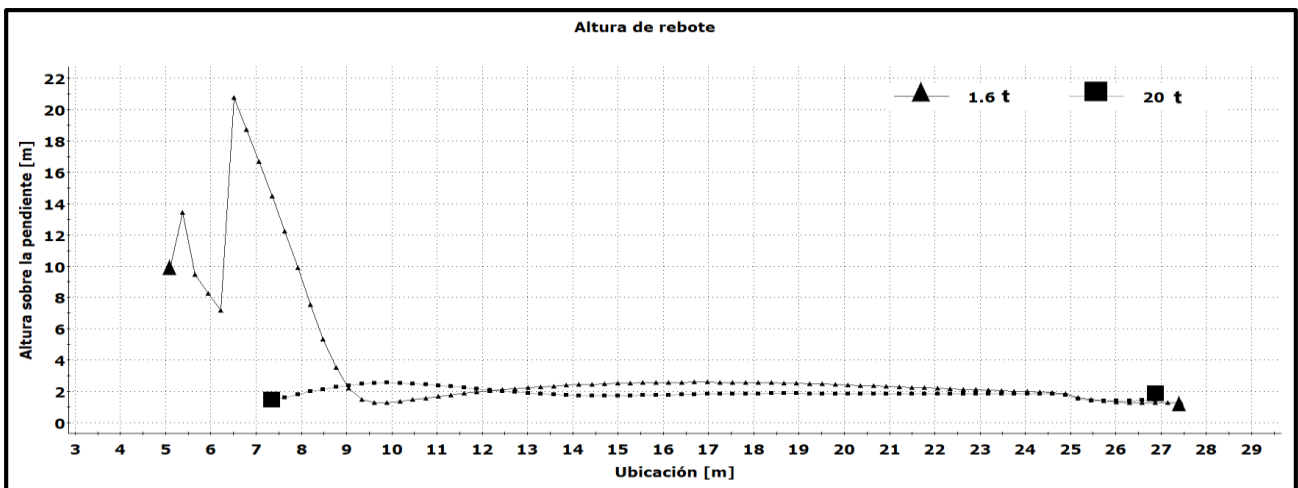
El gráfico de desplazamiento horizontal indica que los bloques de ambos grupos de roca son lo suficientemente capaces de alcanzar la calzada, como se muestra en la (Figura 13) donde se aprecia que llegan a una distancia horizontal entre 25 m y 28 m, donde está la sección del camino.



**Figura 13.-** Gráfico de distribución presentando el punto de desplazamiento final de las rocas caídas.

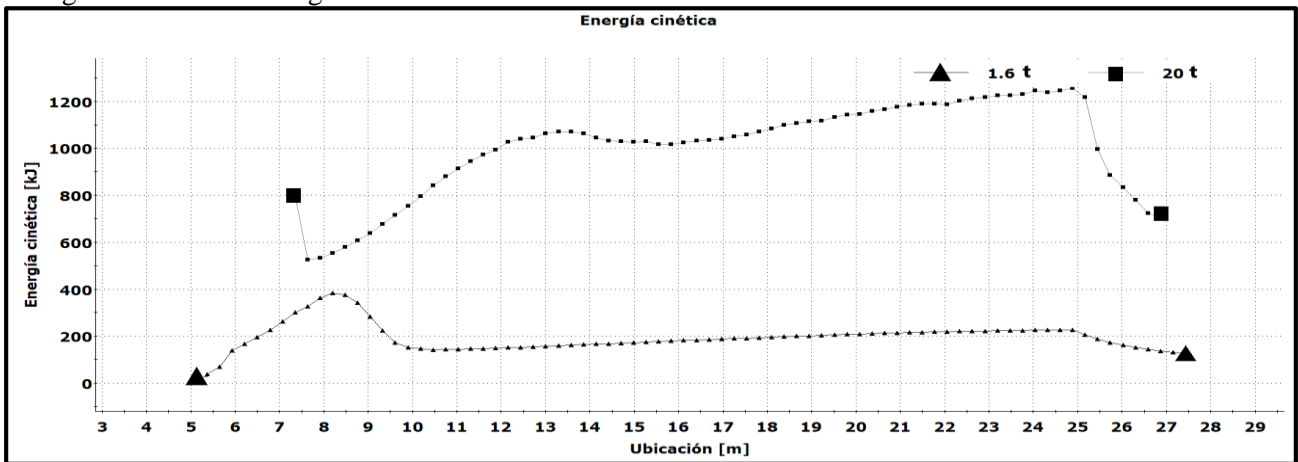
En este análisis se modeló la trayectoria del grupo de rocas 1 y grupo de rocas 2 por separado, por lo tanto, las rocas del grupo 2, equivalentes a un peso de 1.6 t y que caen de las fuentes de desprendimiento (S2) y (S3) están acopladas en una misma curva y son representadas en la curva con un símbolo triangular. Por otro lado, las rocas del grupo 1, equivalentes a un peso de 20 t y que caen desde la fuente de desprendimiento (S1) son modeladas en la otra curva y se distinguen con un símbolo cuadrado.

El gráfico de la (Figura 14) representa la altura media de los rebotes que poseen los bloques sobre la pendiente, a medida que avanzan en el eje horizontal. En la curva del grupo de rocas 2, se puede ver que desde la ubicación de 5 m estas rocas presentan un alza en su altura de rebote hasta llegar a los 20 m sobre la pendiente. Después, desde la ubicación de 6.5 m al caer a la zona de talus estas se amortiguan y comienzan a reducir su altura bruscamente bajo los 2 m. Posteriormente desde la ubicación de 9 m, la altura media de los bloques se mantiene constante cercano a los 2 m, hasta llegar a los 25m. En la otra curva se aprecia que el grupo de rocas 1, desde la ubicación de 7 m luego de experimentar caída libre hasta la parte baja de la ladera, las rocas experimentan una pequeña alza en sus valores hasta llegar a una altura de rebote de 2.5 m. Luego desde la ubicación de 13 m, la altura media se mantiene constante cercano a los 2 m hasta llegar a la ubicación de 25 m. Finalmente al llegar al camino la altura media de rebote de ambos grupos de roca se reduce levemente a 1 m.



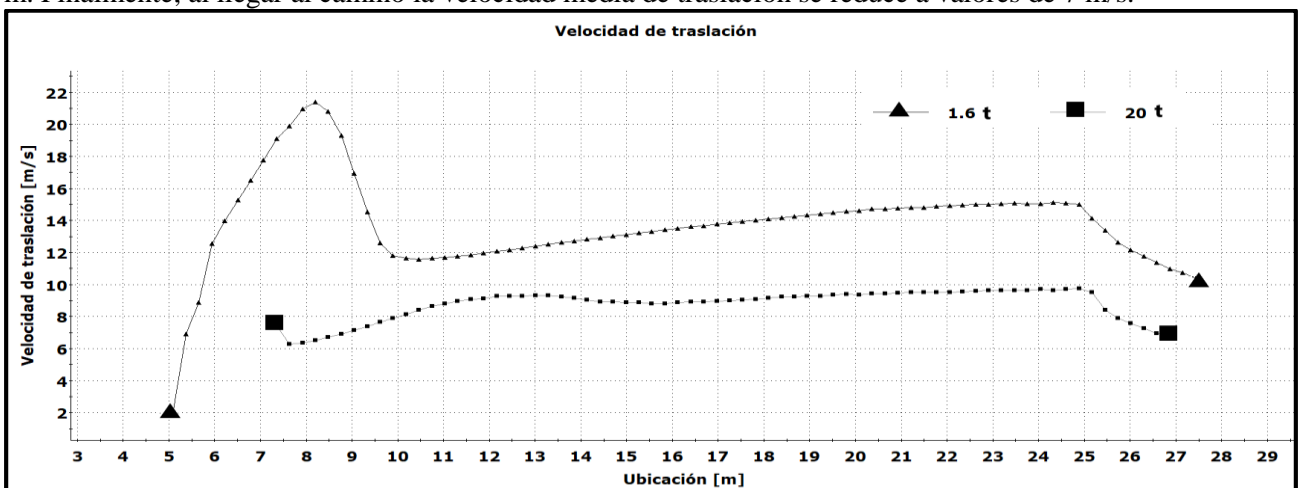
**Figura 14.-** Gráfico presentando la altura media de rebote sobre la pendiente a lo largo de la sección R-R’.

El gráfico de la (Figura 15) representa la energía cinética media que poseen los bloques a medida que avanzan en el eje horizontal. En la curva del grupo rocas 2, se aprecia que desde los 5 m estas rocas presentan un alza en sus valores llegando de 0 a 400 kJ, debido a los rebotes que estas experimentan en la ladera. Después de los 8 m al caer a la zona de talus las rocas se amortiguan y comienzan a disipar su energía llegando a 180 kJ. Posteriormente, desde la ubicación de 15 m la energía cinética media se mantiene constante con valores cercanos a 200 kJ hasta los 25 m. Finalmente, al llegar al camino los valores de energía se reducen a 100 kJ. Por otro lado, en la curva del grupo de rocas 1, desde los 7 m luego de experimentar caída libre a la zona de talus, en los primeros rebotes las rocas disipan su energía desde los 800 kJ hasta los 600 kJ. Posteriormente, desde los 8 m, los valores aumentan constantemente hasta a los 25 m llegando a valores de 1300 kJ. Finalmente, al llegar al camino la energía cinética media de las rocas se reduce a valores de 700 kJ.



**Figura 15.-** Gráfico de la energía cinética media de los bloques en la sección R-R'.

El gráfico de la (Figura 16) representa la velocidad media de traslación que poseen los bloques a medida que avanzan en el eje horizontal. En la curva del grupo de rocas 2, se aprecia que desde la ubicación de 5 m presentan un alza en sus valores desde 2 m/s hasta los 21 m/s. Después de la ubicación de 8 m al caer a la zona de talus estas se amortiguan y comienzan a reducir sus valores de velocidad hasta los 12 m/s. Posteriormente desde los 10 m, los valores de velocidad media aumentan constantemente hasta los 25 m llegando a 15 m/s. Finalmente, al llegar al camino la velocidad media de traslación se reduce 10 m/s. Con respecto a la curva del grupo de rocas 1, desde la ubicación de 7 m luego de experimentar caída libre, los valores de la velocidad se reducen de 8 m/s a 6 m/s, a medida que las rocas avanzan comienza a aumentar su velocidad hasta los 10 m/s. Posteriormente desde la ubicación de 12 m, los valores se mantienen constantes en 10 m/s hasta llegar a los 25 m. Finalmente, al llegar al camino la velocidad media de traslación se reduce a valores de 7 m/s.

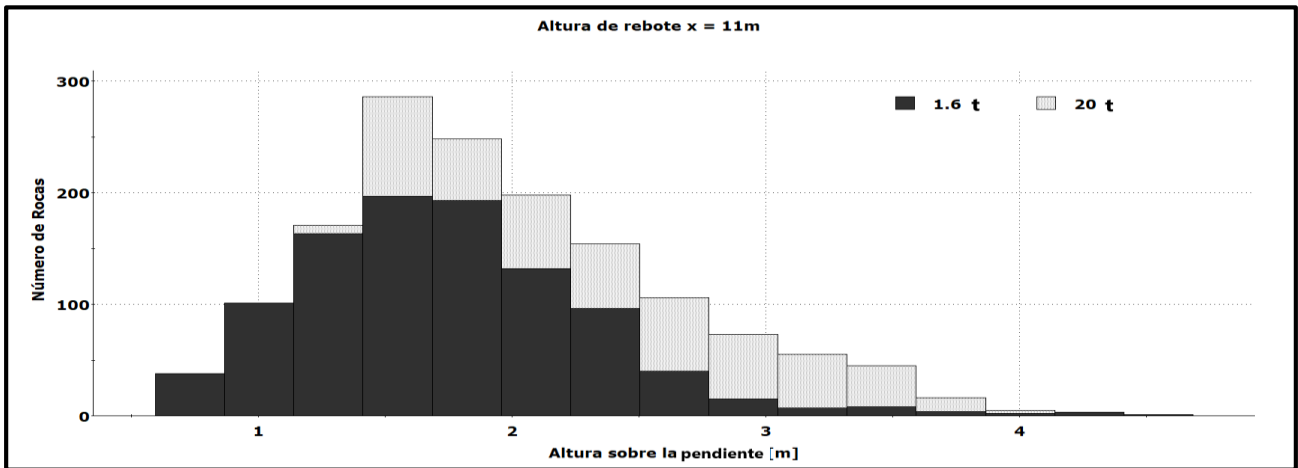


**Figura 16.-** Gráfico de la velocidad media de traslación media de los bloques en la sección R-R'.

Se desprende de los 4 gráficos anteriores, que el 100% de las rocas alcanza el camino. Además, que la ubicación ideal de una barrera es a los 11 m, donde los grupos de roca 1 y 2 poseen menor energía cinética media, menor velocidad media de traslación y rebotan a una altura media inferior a 3 m.

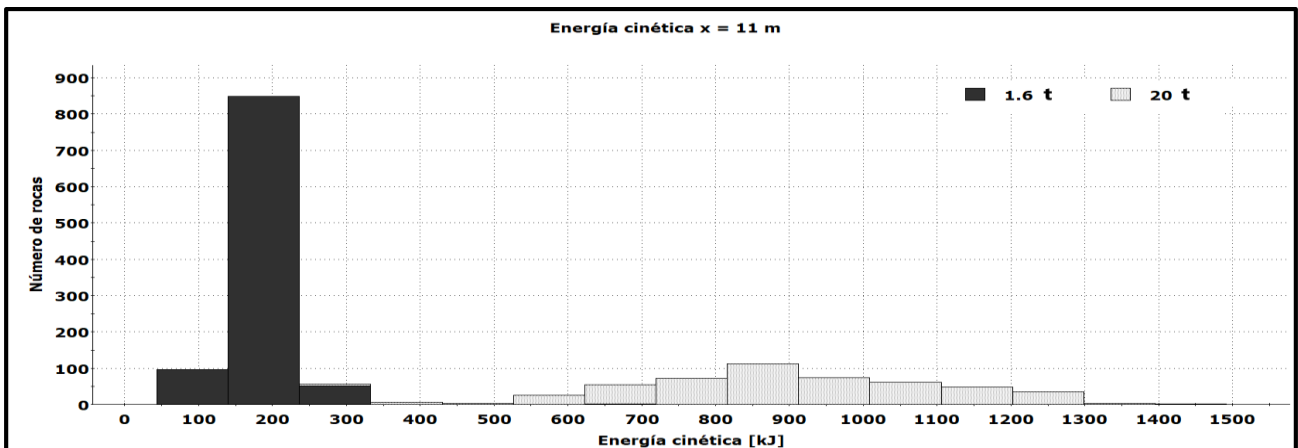
Para calcular el tamaño de la barrera que se debe colocar y la energía cinética que esta debe resistir, se realizó un análisis específico en este punto de la sección. En este análisis también se modeló la trayectoria del grupo de rocas 1 y grupo de rocas 2 por separado, por lo tanto, las rocas del grupo 2, equivalentes a un peso de 1.6 t y que caen de las fuentes de desprendimiento (S2) y (S3) están agrupadas en una misma clasificación y son representadas por los cuadros de color negro. Por otro lado, las rocas del grupo 1, equivalentes a un peso de 20 t y que caen desde la fuente de desprendimiento (S1) son representadas por cuadros de color de gris.

El gráfico de la (Figura 17) representa la distribución de los valores de altura de rebote que poseen los bloques de roca, en la ubicación  $x=11$  m, donde las rocas han sido amortiguadas por la vegetación y los desprendimientos que se han acumulado anteriormente en la zona de talus. Para el grupo de rocas 1, la altura de rebote mínima, media y máxima son 1.3 m, 2.5 m y 4 m, respectivamente. Para el grupo de rocas 2, las alturas de rebote mínimo, medio y máximo son 0.7 m, 2 m y 4.5 m, respectivamente.



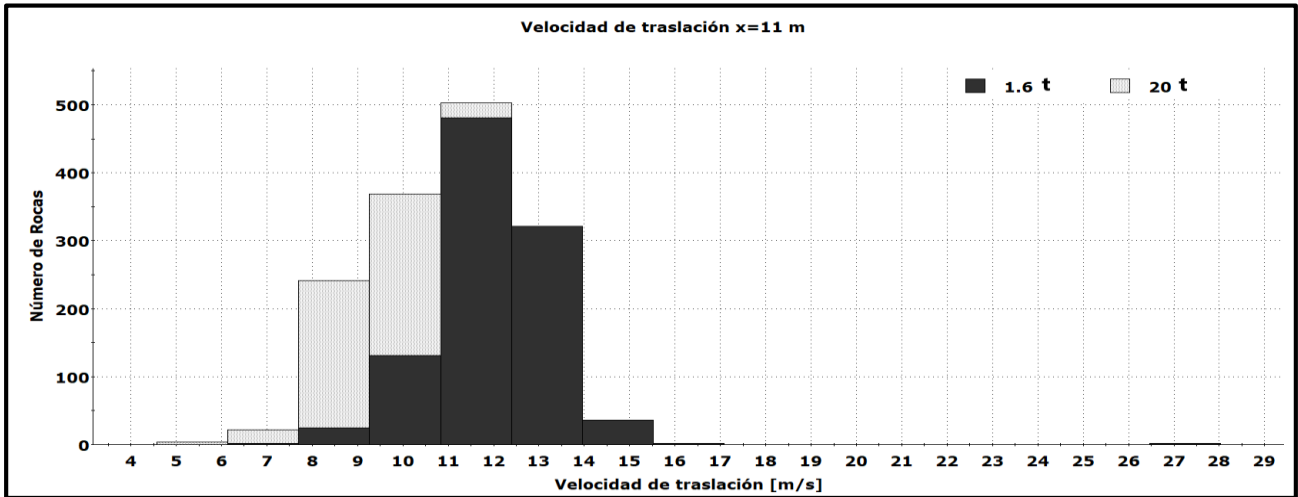
**Figura 17.-** Gráfico de distribución de la altura de rebote de los bloques en  $x=11$  m de la sección R-R'.

El gráfico de la (Figura 18) representa la distribución de los valores de energía cinética que poseen los bloques de roca, en la ubicación  $x=11$  m, donde la energía de las rocas ha sido disipada por la vegetación y los desprendimientos que han caído anteriormente en la zona de talus. Para el grupo de rocas 1, los valores de energía cinética mínima, media y máxima son 300 kJ, 1000 kJ y 1500 kJ, respectivamente. Para el grupo de rocas 2, los valores de energía cinética mínima, media y máxima son 100 kJ, 200 kJ y 300 kJ, respectivamente.



**Figura 18.-** Gráfico de distribución de energía cinética de los bloques en  $x=11$  m de la sección R-R'.

El gráfico de la (Figura 19) representa la distribución de los valores de velocidad de traslación que poseen los bloques de roca, en la ubicación  $x=11$  m, donde las rocas han sido parcialmente detenidas por la vegetación y desprendimientos que se acumulan en la zona de talus. Se puede interpretar que para el grupo de rocas 1, las velocidades de traslación mínima, media y máxima son 4 m/s, 9 m/s y 12 m/s, respectivamente. Para el grupo de rocas 2, las velocidades de traslación mínima, media y máxima son 7 m/s, 13 m/s y 27 m/s, respectivamente.



**Figura 19.-** Gráfico de distribución de la velocidad de traslación de los bloques en  $x=11$  de la sección R-R’.

A continuación, en la (Tabla 5) se indican los valores de energía cinética, velocidad de traslación y altura de rebote que adquiere el grupo de rocas 1 en la posición horizontal  $x=11$  m de la ladera estudiada. De la misma manera, en la (Tabla 6) se indican los valores de energía cinética, velocidad de traslación y altura de rebote que adquiere el grupo de rocas 2 en la posición horizontal  $x=11$  m de la ladera estudiada.

**Tabla 5:** Energía cinética, velocidad de traslación y altura de rebote en la posición  $x=11$  m del grupo de rocas 1 (20 t) a lo largo de la sección R-R’

| Grupo de rocas 1 (20 t) | Valor máximo | Valor medio | Valor mínimo |
|-------------------------|--------------|-------------|--------------|
| Energía cinética (kJ)   | 1500         | 1000        | 300          |
| Velocidad (m/s)         | 12           | 9           | 4            |
| Altura de rebote (m)    | 4            | 2.5         | 1.3          |

**Tabla 6:** Energía cinética, velocidad de traslación y altura de rebote en la posición  $x=11$  m del grupo de rocas 2 (1.6 t) a lo largo de la sección R-R’

| Grupo de rocas 2 (1.6 t) | Valor máximo | Valor medio | Valor mínimo |
|--------------------------|--------------|-------------|--------------|
| Energía cinética (kJ)    | 300          | 200         | 100          |
| Velocidad (m/s)          | 27           | 13          | 7            |
| Altura de rebote (m)     | 4.5          | 2           | 0.7          |

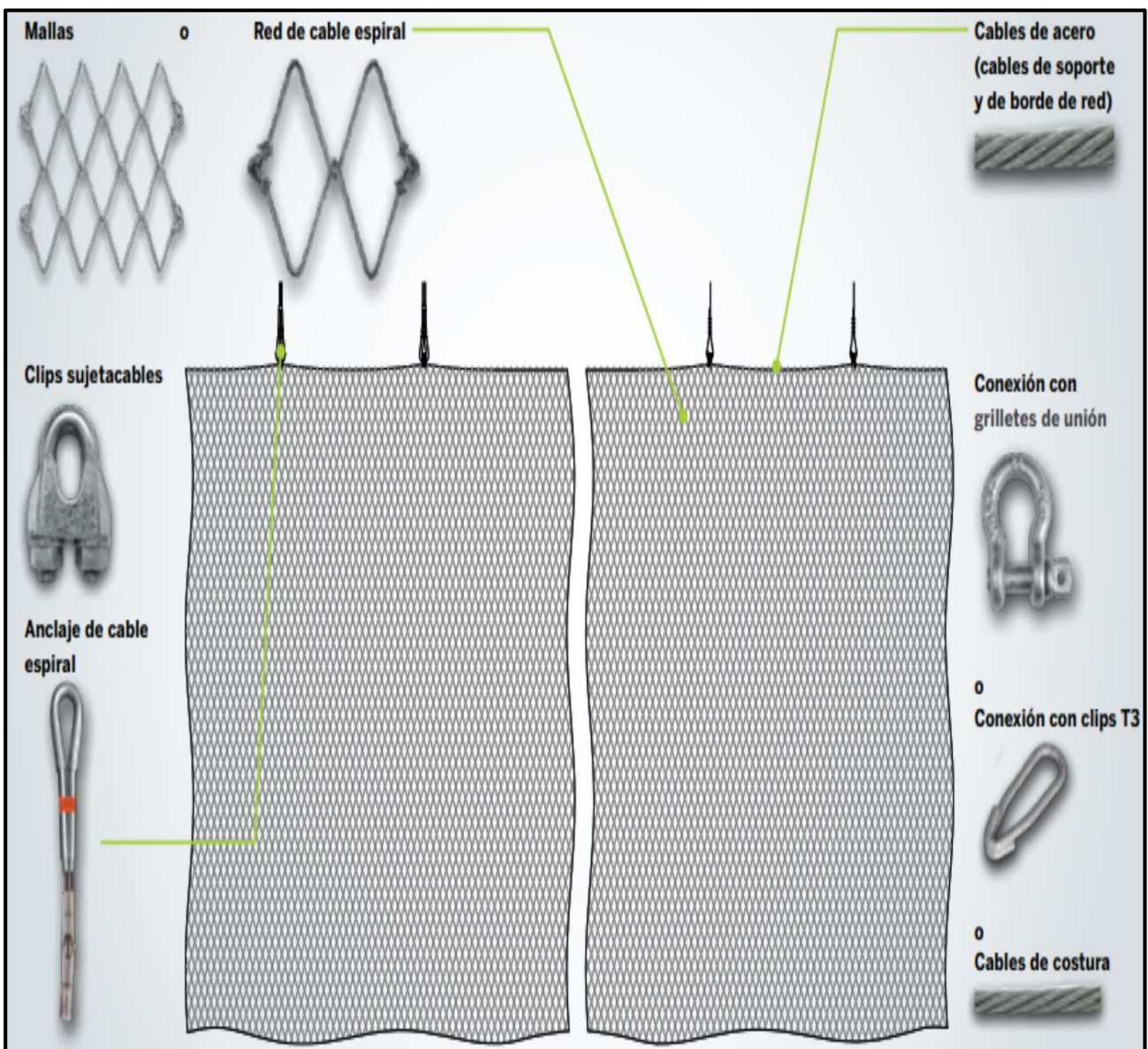
Dada las condiciones de la geomorfología extremadamente irregular de la ladera y según los resultados de las simulaciones en  $x=11$  m, se recomienda que en el caso de instalar una barrera de protección esta cumpla con una capacidad mínima de 1500 kJ para poder resistir los valores máximos de energía del grupo de rocas 1 y que cumpla con una altura mínima de 4.5 m para detener las alturas de rebote máximo del grupo de rocas 2.

#### 4.3.5. Trabajos geotécnicos y de protección

En base a una investigación para elegir medidas de protección contra caídas de rocas, los catálogos de la empresa GEOBRUGG entregan una información preliminar. En base a estas, se determinó que en la zona de estudio las obras de protección que se proponen para mitigar los riesgos de desprendimientos de roca son:

##### 4.3.5.1. Obras de protección en el macizo rocoso

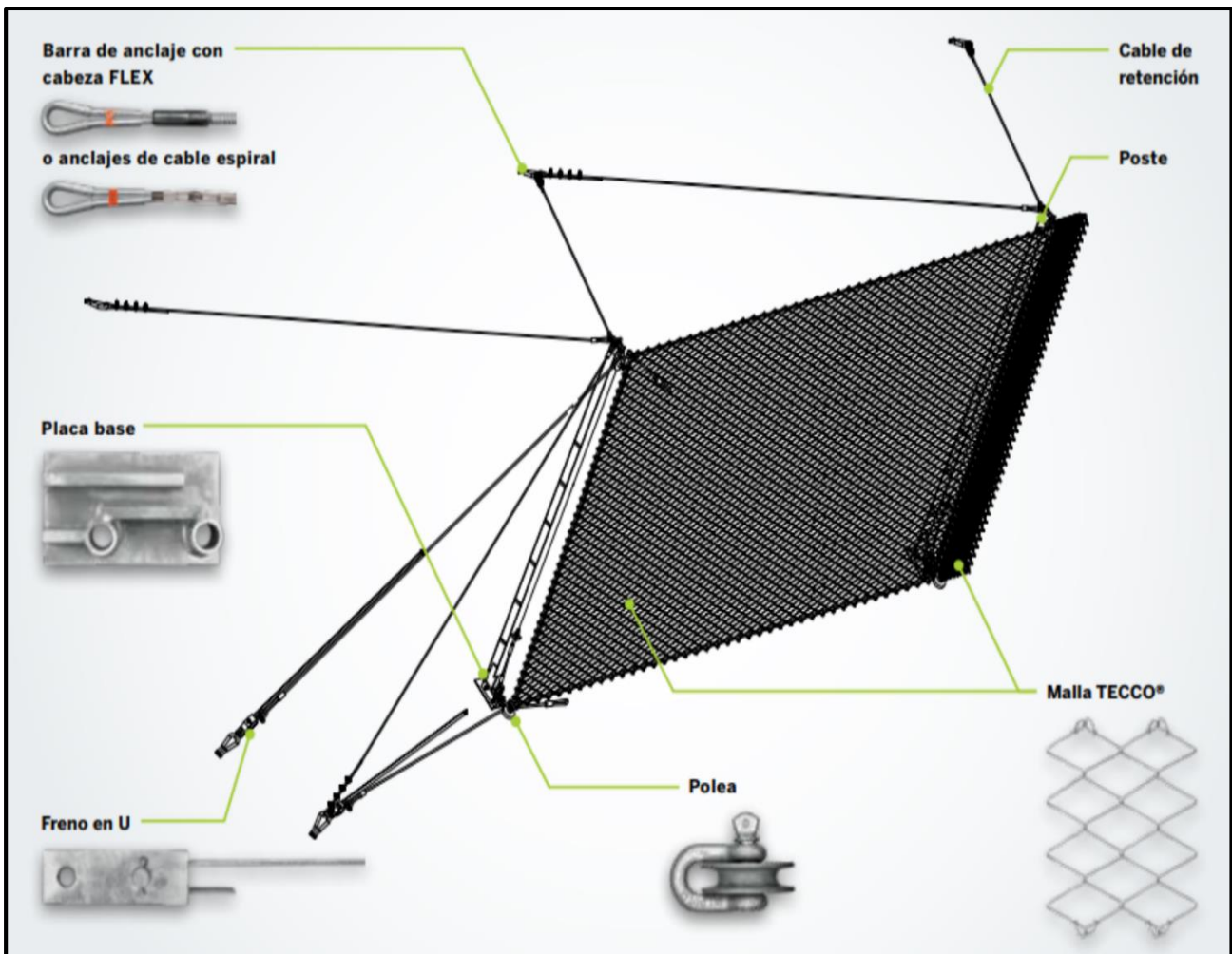
Redes de acero tipo cortina de guiado de alta resistencia con pernos para roca desde la corona hasta la zona de talus, utilizando anclajes de cable espiral para fijar el cable de soporte y los bordes de la red como se indica en la (Figura 20). Además, realizar una limpieza de los bloques más inestables en la ladera por parte de personal especializado y provocar su caída.



**Figura 20.-** Principales componentes de la barrera tipo cortina contra el desprendimiento de rocas. Tomada de catálogo barrera tipo cortina, GEOBRUGG.

#### 4.3.5.2. Obras de protección en la carretera

Según las simulaciones las rocas al rebotar en la ladera caerían a la carretera, por lo que, instalar una barrera tipo GBE deformable de 5 metros de alto en la posición  $x=11$  m para resistir un máximo de 3000 kJ es una opción económica y de fácil instalación contra los desprendimientos de rocas, esta se indica en la (Figura 21).



**Figura 21.-** Principales componentes de la barrera GBE contra el desprendimiento de rocas. Tomada de catálogo barrera GBE - 3000, GEOBRUGG.

## 4.4 Discusión

Las características geológicas y geomorfológicas como los basaltos columnares, la meteorización y la pendiente de las laderas son similares en otros sectores a lo largo de la Ruta Q-45, como es el caso de la ladera sur de la ruta desde el Puente Trubunleo hasta la caseta de entrada de CONAF. Por lo tanto, se podría utilizar la misma metodología usada en este proyecto para evaluar el peligro de caída de rocas.

En relación a las mejoras que se podrían realizar a la metodología utilizada en este estudio, está obtener los coeficientes de restitución con mayor exactitud, ya que se ha detectado que este parámetro tiene gran relevancia en la obtención de los cálculos de energía cinética, velocidad de traslación y altura de rebote. Para esto se recomienda realizar ensayos de laboratorio con el objetivo de conseguir valores lo más parecido a la realidad. Otro de los parámetros que se ha detectado que tiene gran relevancia en los cálculos, es la geometría de la ladera, debido a esto se debe considerar la manera de obtener una resolución del terreno más precisa.

## 5. CONCLUSIONES

El estudio geotécnico, geológico, geomorfológico y las simulaciones de la trayectoria de los desprendimientos indica que la sección de la ladera estudiada en el km 82.3 de la Ruta Q-45, se encuentran levemente inestable. Por lo tanto, es una amenaza de caídas de rocas que requiere atención y medidas de protección adecuadas ya que podrían provocar pérdidas materiales, afectar la seguridad y la vida de los residentes locales y turistas. Las principales causas de los desprendimientos son las fuertes tormentas, cuando el hielo y deshielo actúa sobre las discontinuidades y los movimientos sísmicos.

Se analizaron 3 conjuntos de discontinuidades y se proyectaron en la Red de Schmidt, lo que permitió mostrar la manera en que se organizan las familias de discontinuidades en relación a la cara de la ladera, resultando, que la familia k1 y k4 tienen una disposición paralela a la cara de la ladera.

De acuerdo con la descripción de calidad de macizos rocosos, una puntuación del valor RMR sobre 90 puntos puede considerarse de baja prioridad, mientras que los que tienen bajo 70 requieren medidas correctoras urgentes. En esta investigación se observó que la ladera en la parte (I) y (II) tiene un valor de 65 y 62, respectivamente, esto indica que la calidad del macizo rocoso es relativamente buena, lo cual representa un factor de riesgo medio.

La altura de rebote, la energía cinética, la velocidad de traslación y la distancia recorrida de los bloques de roca se determinaron a partir de las simulaciones realizadas en la versión académica del software Rocfall V.2. Para los bloques de 20 t, la energía cinética máxima fue de 1500 kJ, la altura de rebote máxima resultó ser 4 m y la velocidad máxima de traslación equivale a 12 m/s. Estos 3 parámetros son directamente proporcionales al peso de los bloques al menos en su primer impacto, después puede cambiar debido a la geometría de la ladera y los cambios litológicos. La altura de desprendimiento también es un factor que influye en los resultados de las simulaciones, ya que para las rocas que caen desde la parte (II) con un peso de 1.6 t, si bien la energía cinética máxima resultó ser menor con 300 kJ, se notó un aumento en la altura de rebote máxima que resultó ser 4,5 m y la velocidad de traslación 27 m/s.

De los resultados de la simulación se concluye que la altura de desprendimiento, la pendiente de la ladera y el peso de las rocas que caen son un factor crítico en los estudios de caídas de rocas, por lo tanto, para este estudio con bloques que caen desde una altura máxima de 55 m, una pendiente de la ladera de 85°, bloques que pueden llegar a pesar 20 t y bloques que pueden alcanzar una altura de rebote de 4,5 m, es de suma importancia tener una protección ante los posibles eventos catastróficos que puede desencadenar la caída libre de estas columnas rocosas. Según el análisis, en la posición X=11 m se recomienda la instalación de una barrera flexible GBE capaz de resistir energías de hasta 3000 kJ, que sería una solución económica y de fácil instalación. Para mayor seguridad se pueden instalar barreras tipo cortina desde la coronación de la ladera a una altura de 60 m, para que las rocas puedan ser guiadas a la zona de talus y no reboten libremente por la ladera.

## 6. REFERENCIAS

- BASAHHEL, H. and MITRI, H. 2017.** Application of rock mass classification systems to rock slope stability assessment: A case study. *Journal of rock mechanics and geotechnical engineering*, 9(6):993–1009.
- BIENIAWSKI, Z. 1989.** Clasificación geomecánica RMR. Rock Mass Rating. Universidad Estatal de Pensilvania.
- BÖRGEL, R. 1983.** Geografía de Chile, Tomo II, Geomorfología. Geografía de Chile, Ediciones Instituto Geográfico Militar, Santiago, 182 p.
- BRÜGGEN, J. 1942.** El Volcán Antuco y la geología glacial del valle del Laja. Imprenta Universitaria. 35 p. Santiago de Chile.
- CITRA. 2017.** Mejoramiento Ruta Q-45, Abanico – Paso Internacional Pichachén, Antuco, Región del Biobío.
- COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA (CNE). 2020.** Análisis de la Estadística Hidrológica.
- CRUDEN, D. 1991.** A simple definition of a Landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. No. 43, p. 27 – 29.
- FLYNN, J., CHARRIER, R., CROFT, D., GANS, P., & HERRIOTT, T. 2008.** Chronologic implications of new Miocene mammals from the Cura-Mallín and Trapa-Trapa formations, Laguna del Laja area, south central Chile. *Journal of South American Earth Sciences* 26: 412-423.
- GEOBRUGG.** Diagrama elementos de barrera GBE-3000.
- GEOBRUGG.** Diagrama elementos de barrera tipo cortina.
- GONZÁLEZ, O., & VERGARA, M. 1962.** Reconocimiento geológico de la Cordillera de Los Andes entre los paralelos 35° y 38° S. Universidad de Chile, Instituto de Geología, Publicación No. 24, 119 p.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L. I., FERRER, M., ORTUÑO, L., & OTEO, C. 2002.** Ingeniería geológica. Pearson Educación.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR (IGM). 2001.** Climatología Regional. Santiago, Chile.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR (IGM). 2005.** Atlas Geográfico de la República de Chile. Disponible en: <https://centroderecursos.educarchile.cl:443/handle/20.500.12246/39341>
- INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (ISRM). 1978.** Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests. International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences & Geomechanics* 15: 319-368.
- LOHMAR, S. 2000.** Estratigrafía y geoquímica del volcán Antuco y sus depósitos (Andes del Sur, 37°25'S). Concepción, Chile: Universidad de Concepción. Memoria de Título.

- MELNICK, D., ROSENAU, M., FOLGUERA, A., & ECHTLER, H. 2006.** Evolución tectónica neógena del flanco oeste de los Andes de Neuquén (37-39°S). Geological Society of America Special Paper 407, p. 73–95, doi: 10.1130/2006.2407(04).
- MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS (MOP). 2016.** Integración Chile – Argentina.
- MORENO, H.; VARELA, J.; LAHSEN, A. & VERGARA, M. 1984.** Estudio Geológico del Grupo Volcánico Antuco-Sierra Velluda. Departamento de Geología y Geofísica. Universidad de Chile. Contrato OICB-03.ENDESA. Informe inédito. 164 p. Santiago de Chile.
- NIEMEYER, H. & MUÑOZ, J. 1983.** Hoja Laguna de la Laja. Región del Bío-Bío. Escala 1:250.000. Carta Geológica de Chile. N° 57. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- PANTELIDIS, L. 2009.** Rock slope stability assessment through rock mass classification systems. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 46(2):315–325.
- ROMERO, H. 1985.** Geografía de los Climas. Colección Geográfica de Chile. Tomo XI. Instituto Geográfico Militar (IGM, editores).
- SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA (SERNAGEOMIN). 2015.** Registro de los principales desastres de origen geológico en Chile y efectos sobre la población y bienes públicos y privados desde 1980.
- STEAD, D. & WOLTER, A. 2015.** A critical review of rock slope failure mechanisms: the importance of structural geology. Journal of Structural Geology, 74:1–23.
- THIELE, R.; MORENO, H.; ELGUETA, S.; LAHSEN, A.; REBOLLEDO, S & PETIT-BREUILH, MA E. 1998.** Evolución geológico-geomorfológica cuaternaria del tramo superior del valle del río Laja. Revista Geológica de Chile. Volumen 25. N°2. P. 229-253. Santiago de Chile.
- URRUTIA BARCELÓ, P. E. 2018.** Identificación, caracterización y cuantificación del patrimonio geológico de la zona Sur de la Reserva de la Biósfera corredor biológico nevados de Chillán-Laguna de Laja, Región del Bío-Bío, Chile.
- VARELA, J., MORENO, H., LAHSEN, A., & VERGARA, M. 1988.** Los depósitos de relleno cuaternario del curso superior del río Laja (VIII Región). V Congreso Geológico Chileno. Tomo II D159-D177.
- VARNES D. J. 1978.** Slope Movements, Type and Processes. In: Schuster R.L. & Krizek R.J. (Eds.), Landslides analysis and control. Washington Transportation Research Board, Special Report 176. National Academy of Sciences, WA, 11 – 33.
- VERGARA, M., & MUÑOZ, J. 1982.** La Formación Cola de Zorro en la alta cordillera Andina Chilena (36°–39° Lat. S), sus características petrográficas y petrológicas. Una revisión: Revista Geológica de Chile, v. 17, p. 31–46.