



OBSERVACIONES GEOLÓGICAS RESPECTO A CAÍDAS DE ROCAS EN EL RÍO MAIPO, SECTOR DE PUENTE EL JABONCILLO, COMUNA DE SAN JOSÉ DE MAIPO, REGIÓN METROPOLITANA DE SANTIAGO

Antonio Muñoz M.

Monica Marin D.

Juan Lecaros O.

Pedro Fuentes A.



INFORME TÉCNICO

SUBDIRECCIÓN NACIONAL DE GEOLOGÍA

2022

OBSERVACIONES GEOLÓGICAS RESPECTO A CAÍDAS DE ROCAS EN EL RÍO MAIPO, SECTOR DE PUENTE EL JABONCILLO, COMUNA DE SAN JOSÉ DE MAIPO, REGIÓN METROPOLITANA DE SANTIAGO

INFORME TÉCNICO, 2022

© Servicio Nacional de Geología y Minería. Av. Santa María 0104, Casilla 10465, Santiago, Chile.
Director Nacional (s): Alejandro Cecioni R.
Subdirector Nacional de Geología (s): Álvaro Amigo R.

Este informe se puede difundir o reproducir libremente, siempre y cuando se cite la fuente.

Tipo de Informe Técnico: Asistencia Técnica.

Unidad Ejecutora: Unidad de Peligros Geológicos y Ordenamiento Territorial.

Revisado por: Alejandro Alfaro S., Encargado de Unidad de Peligros Geológicos y Ordenamiento Territorial, y Carolina Jara I., Encargada de Unidad de Asistencias Técnicas y Emergencias Geológicas.

Referencia bibliográfica:

Muñoz A., Marin M., Lecaros J., Fuentes P. 2022. Observaciones geológicas respecto a caídas de rocas en el río Maipo, sector de puente El Jaboncillo, comuna de San José de Maipo, región Metropolitana de Santiago. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Técnico (Inédito): 29 p. Santiago.

Portada: Caídas de rocas en el río Maipo, sector de puente el jaboncillo.

Fotografía: Antonio Muñoz M.

Este Informe inédito está disponible en Biblioteca del Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago:
<http://www.biblioteca.sernageomin.cl>

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	6
2. GEOLOGÍA	7
2.1. Geología regional.....	7
2.1. Geología local.....	8
3. REMOCIONES EN MASA.....	11
3.1. Definiciones	11
3.2. Registro de remociones en masa en el área de estudio.....	14
4. OBSERVACIONES DE TERRENO	16
5. LEVANTAMIENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO	19
6. ANÁLISIS.....	21
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	25
8. REFERENCIAS.....	27

FIGURAS

Fig. 1. Ubicación del área de estudio.....	6
Fig. 2. Geología regional del área de estudio.....	8
Fig. 3. Geología local del área de estudio.....	10
Fig. 4. Tipos de movimientos de remociones en masa.....	12
Fig. 5. Ejemplos de caídas de rocas en la Comuna de San José de Maipo.....	15
Fig. 6. Reunión inicial de jornada de terreno.....	16
Fig. 7. Remoción en masa ocurrida en el sector puente El Jaboncillo.....	17
Fig. 8. Remoción en masa ocurrida en el sector puente El Jaboncillo. Vista general.....	18
Fig. 9. Equipo de cartografía de Sernageomin operando UAV.....	19
Fig. 10. Productos aerofotogramétricos del vuelo con UAV.....	20
Fig. 11. Subproductos del modelo digital de superficie (DSM) pendientes de ladera y sombreado.....	20
Fig. 12. Clasificación de la remoción en masa.....	21
Fig. 13. Formación de fracturas asociadas a un sistema de plegamiento.....	22

Fig. 14. El antes y después del área de generación de la remoción en masa.....	22
Fig. 15. El antes y después del macizo rocoso.....	24
Fig. 16. Configuración geológica-estructural del macizo rocoso.....	24

TABLAS

Tabla 1. Tipos de remociones en masa.....	11
Tabla 2. Escala de velocidades de remociones en masa.....	13
Tabla 3. Registro de estudios de caídas de rocas de Sernageomin en San José de Maipo.....	14

OBSERVACIONES GEOLÓGICAS RESPECTO A CAÍDAS DE ROCAS EN EL RÍO MAIPO, SECTOR DE PUENTE EL JABONCILLO, COMUNA DE SAN JOSÉ DE MAIPO, REGIÓN METROPOLITANA DE SANTIAGO

RESUMEN

Este documento da respuesta a la solicitud formulada vía correo electrónico por parte del Director Regional de la Oficina Nacional de Emergencia (Onemi) de la región Metropolitana, Sr. Miguel Muñoz, en la cual indica que la Directora Regional de Obras Hidráulicas de la región Metropolitana, Sra. Paula Marín, requiere que Sernageomin elabore un informe técnico para orientar la forma en la cual remover el depósito de caídas de rocas que obstruye el cauce del río Maipo en el sector del puente El Jaboncillo, en la comuna de San José de Maipo.

Este informe considera las observaciones técnicas realizadas por la geóloga Monica Marin y el geólogo Antonio Muñoz, en el sector puente El Jaboncillo de la comuna de San José de Maipo. Las herramientas e insumos utilizados para este trabajo, comprenden el levantamiento de información geológica y aerofotogrametría, con el fin de realizar una interpretación preliminar de los mecanismos de generación de la remoción en masa ocurrida.

1. INTRODUCCIÓN

El presente informe tiene el objetivo de realizar un análisis geológico de las condiciones que generaron las caídas de rocas que se depositaron en el río Maipo, sector de puente El Jaboncillo, comuna de San José de Maipo (Fig. 1).

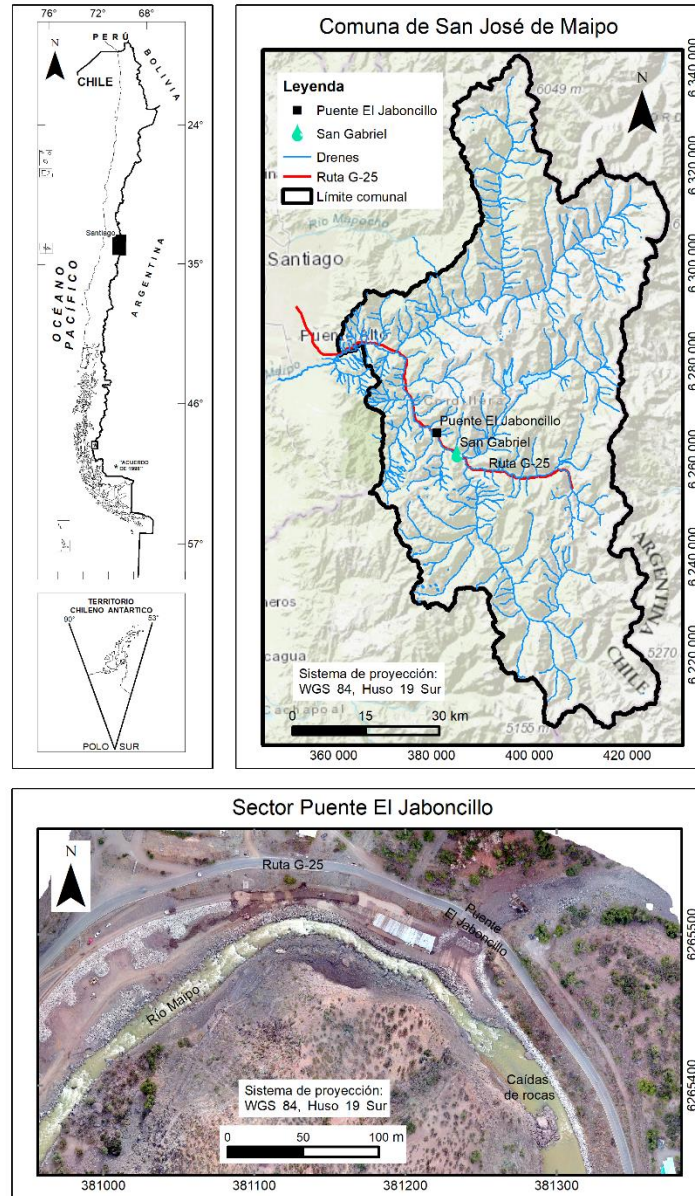


Fig. 1. Ubicación del área de estudio.

2. GEOLOGÍA

2.1. Geología regional

La geología del área de estudio de mayor detalle disponible corresponde a la mapeada a escala 1:50.000 por Moreno *et al.* (1991) y ajustada por Espinoza *et al.* (2019). Dentro de esta domina la presencia de la Formación Abanico Occidental (Eoceno-Oligoceno) y depósitos coluviales y fluviales (Holoceno). Se reconoce un pliegue sinclinal cercano al área de estudio (Fig. 2).

La Formación Abanico corresponde a una unidad litoestratigráfica constituida por lavas básicas a intermedias, rocas piroclásticas ácidas, e intercalaciones sedimentarias continentales (fluviales, aluviales y lacustres). Esta formación se encuentra plegada y es afectada por un pervasivo metamorfismo de muy bajo grado. El espesor del conjunto se estima en 3.000 m aprox., aun cuando se acepta que éste aparece aumentado por las numerosas intrusiones de filones-manto y lacolitos andesíticos (Thiele, 1980). En particular, según Moreno *et al.* (1991) en esta formación existe un pliegue sinclinal cuyo eje, de rumbo N30W, está a 600 m de la zona de caídas de rocas analizadas en el presente estudio. Además, estos autores dan cuenta de un rumbo/manteo de los estratos de N50/15SO (Fig. 2).

Los depósitos fluviales corresponden a bloques, gravas, arenas, limos y arcillas. Son el principal material de relleno de la Depresión Central y de todos los valles interiores del área de estudio. Sobresalen entre estos últimos aquéllos que forman los importantes niveles de terrazas en el valle del río Maipo (Thiele, 1980) (Fig. 2).

Los depósitos coluviales presentan estratificación interna poco definida y en muchas ocasiones solo insinuada, predominando los depósitos de tipo masivo. Estos depósitos con formas laminares se disponen en las laderas y desarrollan pendientes fuertes de unos 20 a 25°, o bien se ubican al pie de laderas constituyendo gruesos apilamientos de formas cónicas y con varias decenas de metros de espesor en algunos casos (Fig. 2). Su génesis se asocia a meteorización mecánica y química, vinculados al efecto de heladas y variaciones bruscas de la temperatura en las rocas expuestas. Los materiales producidos forman un manto in situ como coberturas de suelos o escombros de falda o eventualmente caen en fragmentos individualmente desde los

puntos altos del relieve al pie de los faldeos de la zona, por efecto de la gravedad, pero ayudados en menor o mayor grado por aguas que provienen de precipitaciones o fusión de nieves (Moreno *et al.*, 1991; Herrera, 2016; Muñoz, 2018).

Los depósitos de remoción en masa presentan gran distribución espacial (Fig. 2). Los materiales de los depósitos más jóvenes están completamente sueltos y se presentan estabilizados, sin embargo, ciertos niveles de inestabilidad que podrían generar movimientos de volúmenes importantes (Thiele, 1980; Herrera, 2016).

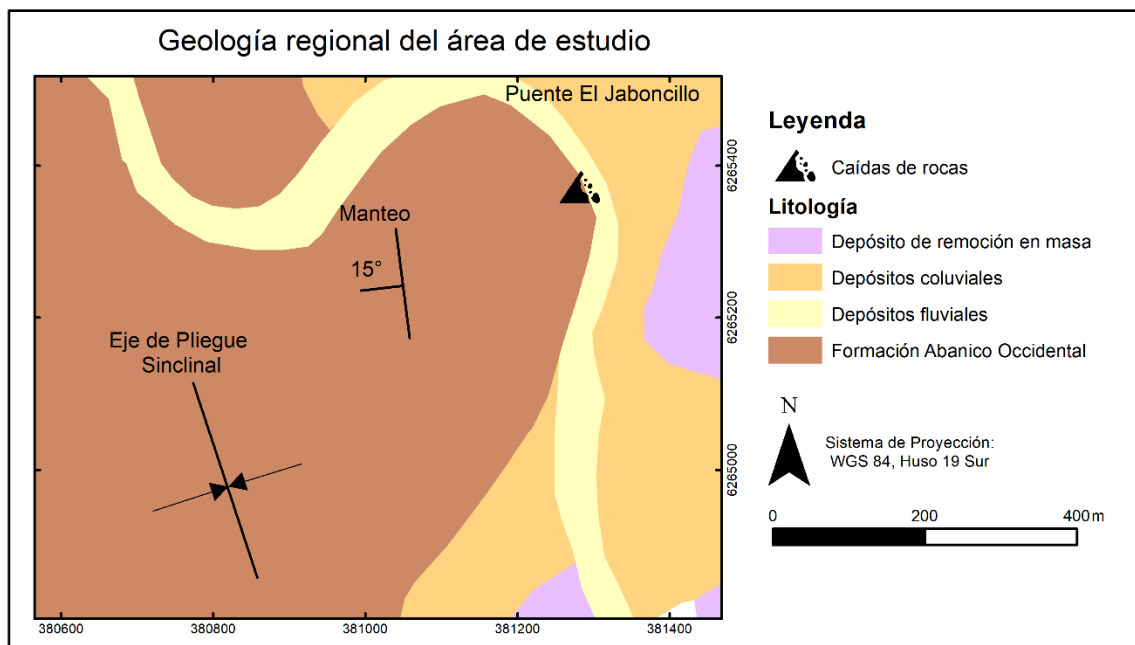


Fig. 2. Geología regional del área de estudio a escala 1:50.000. Modificado de Espinoza *et al.* (2019) y Moreno *et al.* (1991).

2.1. Geología local

A partir de los trabajos de Espinoza *et al.* (2019), Moreno *et al.* (1991) y Muñoz (2018) se elabora un mapa litológico local (escala 1:5.000) del área de estudio, mediante la fotointerpretación de imágenes aéreas y observaciones de terreno, con lo cual se caracterizan las unidades correspondientes a Formación Abanico fracturada, Formación Abanico con cobertura de suelo, depósitos coluviales y depósitos fluviales (Fig. 3).

La Formación Abanico fracturada se caracteriza por estar meteorizada y fracturada. Las rocas más incompetentes corresponden a lavas de grano fino (andesitas) e intercalaciones sedimentarias (lutitas y areniscas finas). Se encuentra en toda el área de estudio, principalmente en las zonas más próximas a estructuras tipo fallas y pliegues (Muñoz, 2018) (Fig. 3).

La Formación Abanico con cobertura de suelo tiene un desarrollo de suelo superficial residual que genera una topografía suave y su espesor varía de métrico a decamétrico, principalmente en las zonas localmente más elevadas, corresponde a suelo arenoso a gravoso denso, con un porcentaje de material fino limoso variado. Suele estar cubierto por escasa vegetación (Muñoz, 2018) (Fig. 3).

Los depósitos coluviales corresponden a acumulaciones de sedimentos gruesos de tamaños variables, que generalmente se muestran en forma de conos de deyección al pie de la Unidad Abanico fracturada o como mantos sobre ésta. Se encuentran en las zonas de alta pendiente que gradualmente decrecen. Sus depósitos tienen un espesor decimétrico a métrico, son pobremente gradados y el tamaño promedio de sus clastos son centimétricos a decimétricos. Dentro de éstos, domina una compacidad baja, con escasa a nula cobertura vegetal y una litología perteneciente a la Formación Abanico. Los clastos son de variada angulosidad y esfericidad, mientras que su pendiente de reposo varía entre 10 y 40° (Muñoz, 2018). Se incluyen en esta unidad las caídas de rocas informadas (Fig. 3).

Los depósitos fluviales en general forman barras, no tienen desarrollo de vegetación y son de color gris a marrón, densos, de moderada a buena selección, con clastos subangulosos a subredondeados, de moderada esfericidad, de granulometría variable, desde arenas gruesas a bolones (en ocasiones con limo) (Fig. 3).

Por su parte, los depósitos antrópicos están asociados a rocas sueltas que conforman el enrocado de protección en la ribera del río Maipo (Fig. 3).

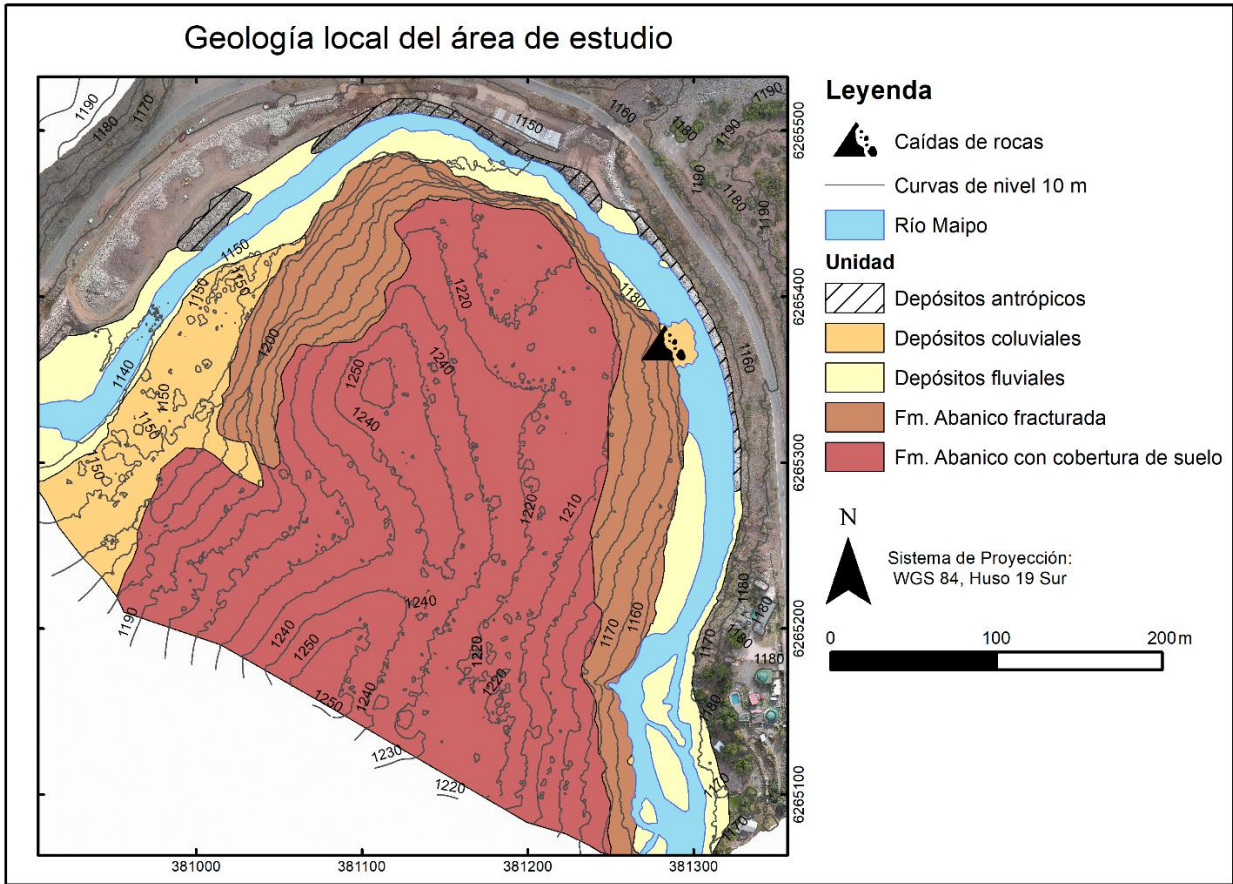


Fig. 3. Geología local del área de estudio a escala 1:5.000. Modificado de Espinoza *et al.* (2019), según definiciones de Muñoz (2018).

3. REMOCIONES EN MASA

3.1. Definiciones

Las remociones en masa son procesos de transporte de un volumen de material definidos como aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, de detritos, de regolito o de tierra que son impulsados por la gravedad (Cruden, 1991; Proyecto Multinacional Andino, 2007). Su clasificación general se basa en el mecanismo del movimiento, y según este criterio pueden ser de tipo caída, volcamiento, deslizamiento, flujo, propagación y deformación de ladera (Tabla 1 y Figura 4).

Existen dos factores que determinan la ocurrencia o no de una remoción en masa: condicionantes y desencadenantes. El primero se define como un agente que genera una situación de potencial inestabilidad sobre una unidad geológica, mientras que el segundo, corresponde a un estímulo externo que, tras su actividad, genera una respuesta directa e inmediata de una remoción en masa (Muñoz *et al.*, 2018).

Los principales factores condicionantes son la geología, geomorfología y parámetros morfométricos (pendiente, curvatura, etc.), mientras que los desencadenantes más frecuentes son las lluvias y los sismos y, secundariamente la actividad antrópica, la fusión de nieve y erupciones volcánicas, entre otras (Lara, 2007).

Tabla 1. Tipos de remociones en masa. Tomado de Hungr *et al.* (2013).

Tipo de remoción en masa	Roca	Suelo
Caídas	Caídas de roca	Caídas de bloque/detrito/limo
Deslizamiento	Deslizamiento rotacional de roca Deslizamiento plano de roca Deslizamiento en cuña de roca Deslizamiento compuesto de roca Deslizamiento irregular de roca	Deslizamiento rotacional de arcilla/limo Deslizamiento plano de arcilla/limo Deslizamiento de grava/arena/detritos Deslizamiento compuesto de arcilla/limo
Volcamiento	Volcamiento de bloque de roca Volcamiento flexural de roca	Volcamiento de grava/arena/limo

Continuación Tabla 1.

Tipo de remoción en masa	Roca	Suelo
Flujo	Avalancha de roca	Flujo seco de arena/limo/detritos Deslizamiento-Flujo de arena/limo/detritos Deslizamiento-Flujo de arcillas sensibles Flujo de detritos Flujo de lodo o barro Crecida de detritos Avalancha de detritos Flujo de tierra Flujo de turba
Propagación	Propagación de roca en pendiente	Propagación por licuefacción de arena/limo Propagación de arcilla sensible
Deformaciones de laderas	Deformación de laderas de montaña Deformación de laderas de roca	Deformación de laderas de suelo Reptación de suelos Solifluxión

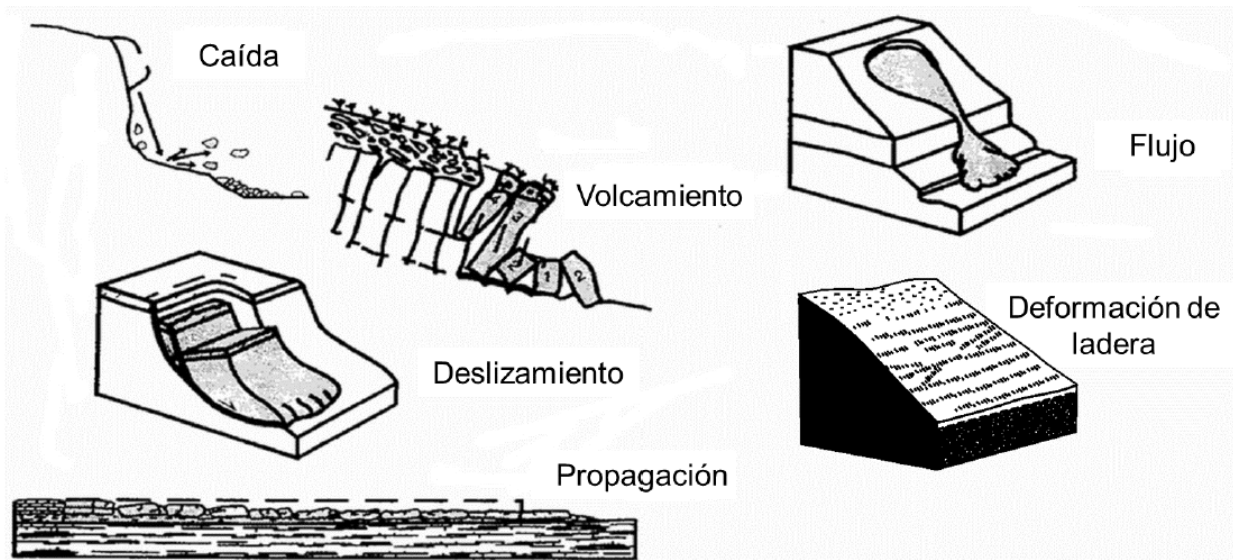


Figura 4. Tipos de movimientos de remociones en masa. Modificado de Cruden y Varnes (1996).

Una de las diferencias determinantes entre cada tipo de remoción es la velocidad a la cual estas se producen. Cruden y Varnes (1996) propusieron una escala de velocidades para cada tipo de remoción en masa (Tabla 2), la cual clasifica las velocidades en 7 categorías, desde “extremadamente lenta” a “extremadamente rápida” (Muñoz *et al.*, 2021).

Tabla 2. Escala de velocidades de remociones en masa de acuerdo con Cruden y Varnes (1996). Tomado de Hungr *et al.* (2013).

Clases de velocidad	Descripción	Velocidad (mm/s)	Velocidad típica	Respuesta humana
7	Extremadamente rápida	5×10^3	5 m/s	Nula
6	Muy rápida	5×10^1	3 m/min	Nula
5	Rápida	5×10^{-1}	1,8 m/h	Evacuación
4	Moderada	5×10^{-3}	13 m/mes	Evacuación
3	Lenta	5×10^{-5}	1,6 m/año	Mantenimiento
2	Muy lenta	5×10^{-7}	16 mm/año	Mantenimiento
1	Extremadamente lenta			Nula

La caída es un tipo de remoción en masa en el cual uno o varios bloques de roca o suelo (bloque/detrito/limo/arcilla) se desprenden de una ladera, con un desplazamiento cortante leve o nulo. El material desprendido desciende de forma no cohesiva, principalmente mediante el aire a través de golpes, rebotes y rodamiento (Varnes, 1978). Suele ocurrir con velocidades muy rápidas a extremadamente rápidas (Tabla 2), muchas veces en caída libre (Muñoz *et al.*, 2021).

Un deslizamiento es un tipo de remoción en masa cuyo desplazamiento ocurre predominantemente a lo largo de una superficie en la cual se desarrolla una gran deformación cortante. Pueden ser clasificados como rotacionales, traslacionales (planares o en cuña), compuestos e irregulares, involucrando diferentes tipos de material como roca, arena, grava, limo, arcilla, entre otros (Muñoz, 2018).

Un volcamiento es un tipo de remoción en masa en el que hay una rotación generalmente hacia adelante y hacia el exterior de la ladera de uno o varios bloques de roca o suelo, alrededor de un punto o pivote de giro en su parte inferior. Este movimiento ocurre por acción de la gravedad, por empujes de las unidades adyacentes o por la presión de fluidos en grietas (Varnes, 1978; Proyecto Multinacional Andino, 2007). Otra característica importante para su ocurrencia es que las discontinuidades deben tener un manto opuesto a la pendiente de la ladera (Muñoz, 2018).

Un flujo es un tipo de remoción en masa que durante su desplazamiento exhibe un comportamiento mecánico semejante al de un fluido; puede ser extremadamente rápido o lento, saturado o seco (Muñoz, 2018). Los subtipos más conocidos e identificables por la población son los “aluviones” (flujos de detritos, crecidas de detritos y flujos de lodo) y las avalanchas (de roca y de detritos).

3.2. Registro de remociones en masa en el área de estudio

Durante los últimos años han ocurrido numerosas caídas de rocas en la comuna de San José de Maipo, las cuales se asocian principalmente a cortes del talud en caminos. Estos eventos han provocado cortes de tránsito e incluso fallecidos. En particular, en la Tabla 3 se resumen los informes referentes a caídas de rocas en la comuna desarrollados por Sernageomin en la última década (Fig. 5).

Tabla 3. Registro de estudios de caídas de rocas de Sernageomin en San José de Maipo.

Lugar de referencia	Fecha	Descripción	Fuente
Cerro Divisadero	13 de junio de 2012	Inspección técnica por derrumbe en vivienda de Av. El Carmen, comuna de San José de Maipo.	Marín y Garrido (2012)
El Guayacán	18 de junio de 2012	Inspección técnica por derrumbe e inestabilidad de macizo rocoso en el km 51 de la ruta G-25 de la comuna de San José de Maipo, región Metropolitana.	Ramírez y Garrido (2012)
La Cortina, Embalse El Yeso	3 de junio de 2019	Evaluación de peligro por caída de rocas en el sector del Embalse el Yeso, ruta G-455, comuna de San José de Maipo, región Metropolitana	Jara y Alfaro (2019)
Ruta G-25	-	Evaluación y zonificación del peligro de remociones en masa en Ruta G-25 Camino al Volcán, San José de Maipo, Región Metropolitana.	Báez (2020)
Ruta G-455	-	Zonificación de susceptibilidad de remociones en masa en la ruta G-455, comuna de San José de Maipo, región Metropolitana.	Farías (2021)
El Ingenio, Ruta G-25	Entre el 29 y 31 de enero de 2021	Efectos geológicos del sistema frontal entre el 29 y 31 de enero de 2021 en el segmento La Obra-Las Melosas, cuenca del río Maipo, Región Metropolitana.	Villela y Sepúlveda (2021)

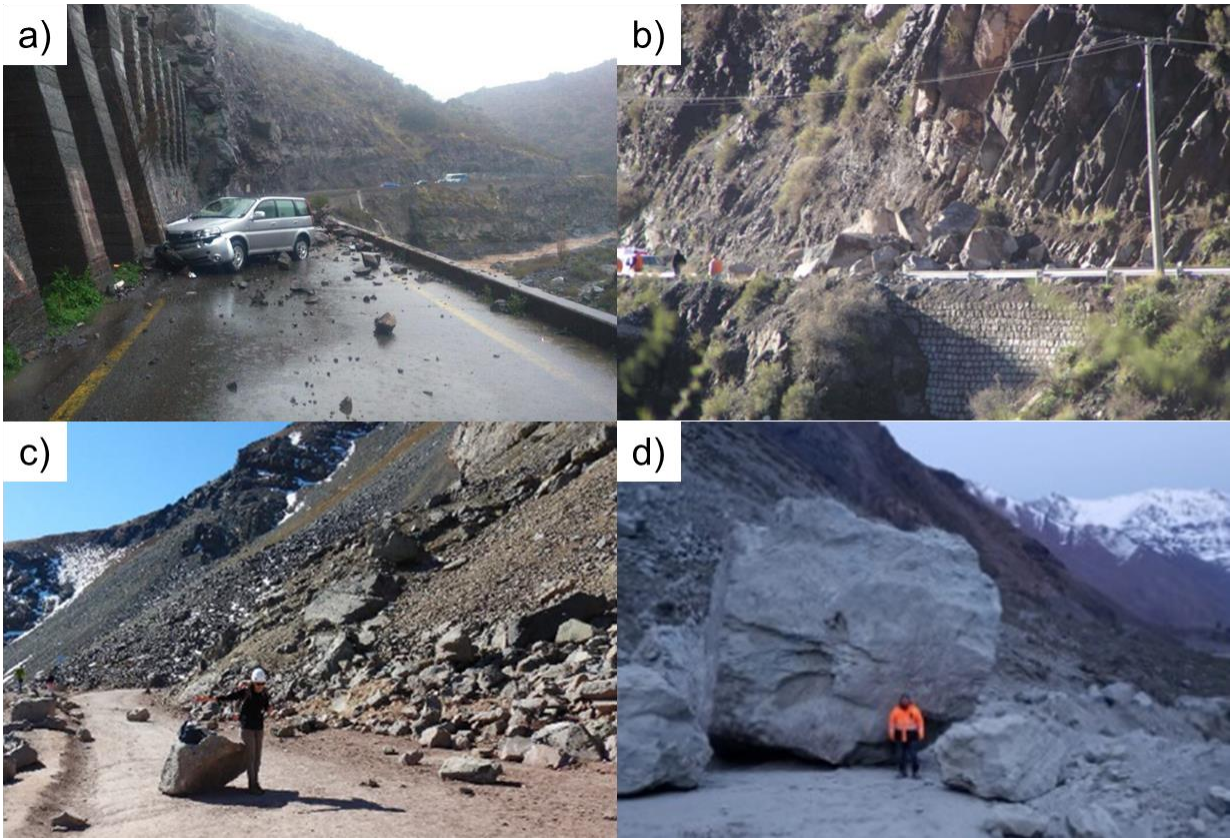


Fig. 5. Ejemplos de caídas de rocas en la comuna de San José de Maipo. a) Caídas de rocas en ruta G-25 en túnel El Tinoco (06-08-2015) y b) en km 51 (18-06-2012). c) Caídas de rocas en la ruta G-455, sector del Embalse el Yeso. d) Caídas de rocas en sector Lo Valdés¹.

Por otro lado, es importante mencionar que han ocurrido flujos en el estero Jaboncillo que han alcanzado el puente homónimo (Fig. 1). El más antiguo registrado fue un flujo de detritos que ocurrió el 20 de mayo de 1949 el cuál arrasó con el puente (Hauser, 1985), mientras que el más reciente tuvo lugar el 30 de enero de 2021 (Villela y Sepúlveda, 2021).

¹ <https://storymaps.arcgis.com/stories/0cc9e3dd3042455f839e85ed610bbcd5>

4. OBSERVACIONES DE TERRENO

El viernes 13 de mayo de 2022 se realizó una visita a terreno con el objetivo de describir el área de estudio y determinar los mecanismos de generación de la remoción en masa (Fig. 1). En primer lugar, se sostiene una reunión entre profesionales de Sernageomin, la Dirección de Vialidad, y la Dirección de Obras Hidráulicas para contextualizar la problemática de la remoción en masa (Fig. 6). En esta reunión se indica que, aunque la remoción en masa solo ha llegado a obstaculizar parcialmente el cauce del río Maipo, en caso de una crecida podría generar en esa sección flujos de alta velocidad que, eventualmente podrían erosionar el enrocado de protección que se desarrolla entre la ruta G-25 y el río (Fig. 7).



Fig. 6. Reunión inicial de jornada de terreno entre profesionales de Sernageomin, la Dirección de Vialidad, y la Dirección de Obras Hidráulicas.

Un primer rasgo que destaca es el talud sub-vertical de unos 60 m de altura con respecto a la superficie del río Maipo. En la base de este talud y sobre el cauce del río hay un depósito de remoción en masa que cubre 2/3 del perfil transversal de este último. El macizo rocoso está estratificado, deformado y presenta abundantes discontinuidades (fracturas y diaclasas) en diferentes direcciones. En su parte superior, se aprecia el desarrollo de suelo residual con escaso desarrollo de vegetación. La litología del talud es afín con la descripción de la Formación Abanico (Figs. 2 y 3), cuyos estratos tienen un rumbo/manteo aparente de N45O/20SO (Fig. 7).

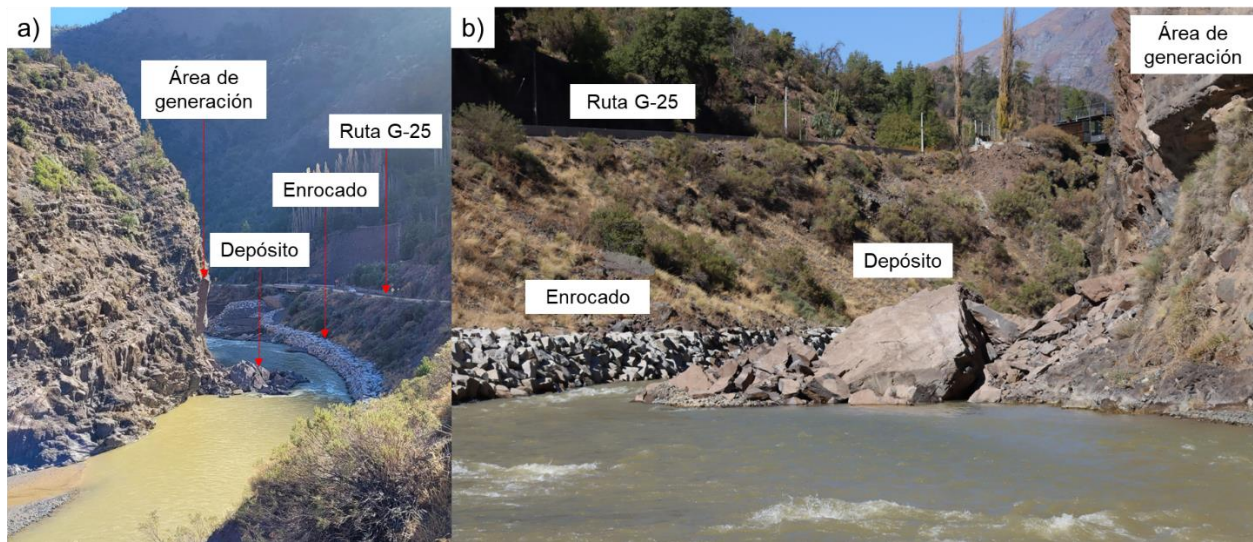


Fig. 7. Remoción en masa ocurrida en el sector puente El Jaboncillo. a) Vista hacia aguas abajo del río Maipo. b) Acercamiento con vista hacia aguas arriba del río Maipo. Ubicación de fotografías (Lat/Long): (a) 33°44.669'S/ 70°16.909'O y (b) 33°44.780'S/ 70°16.858'O.

El área de generación de la remoción en masa tiene forma de trapecio (casi triangular) y se encuentra entre 1 y 15 m sobre la cota del río y tiene unos 20 m de ancho aprox., con lo cual, se estima un volumen de alrededor de 150 m³, lo que se traduce en casi 400 ton de material. Esta área está limitada por atrás por una fractura sub-vertical con rumbo aparente de N10O y es principalmente de color rojizo (60%) con manchas grises (40%), los cuales corresponden a relleno de fractura y roca fresca, respectivamente. Además, se identifican en todo el macizo rocoso un set de fracturas/diaclasas con orientación rumbo/manteo aparente de N30E/80NO.

El depósito de la remoción en masa se emplaza en la base del talud sobre otro de origen fluvial, atribuible a una barra del río Maipo y se caracteriza por ser de mala selección, compuestos de clastos volcánicos (andesíticos) de color gris oscuro rojizo, con aparente oxidación, angulosos, de moderada a baja esfericidad, principalmente bloques de tamaño decimétrico a métrico, sueltos en una matriz gravo-arenosa. Se identifican dos bloques de gran tamaño, uno de 60 m³ (6×5×2 m³) y otro de 20 m³ (4×3×1,5 m³) aprox. Además, se reconocen clastos de la remoción en masa sobre el enrocado. Sobre este último también se observan depósitos de arena atribuible a una inundación (Fig. 8).

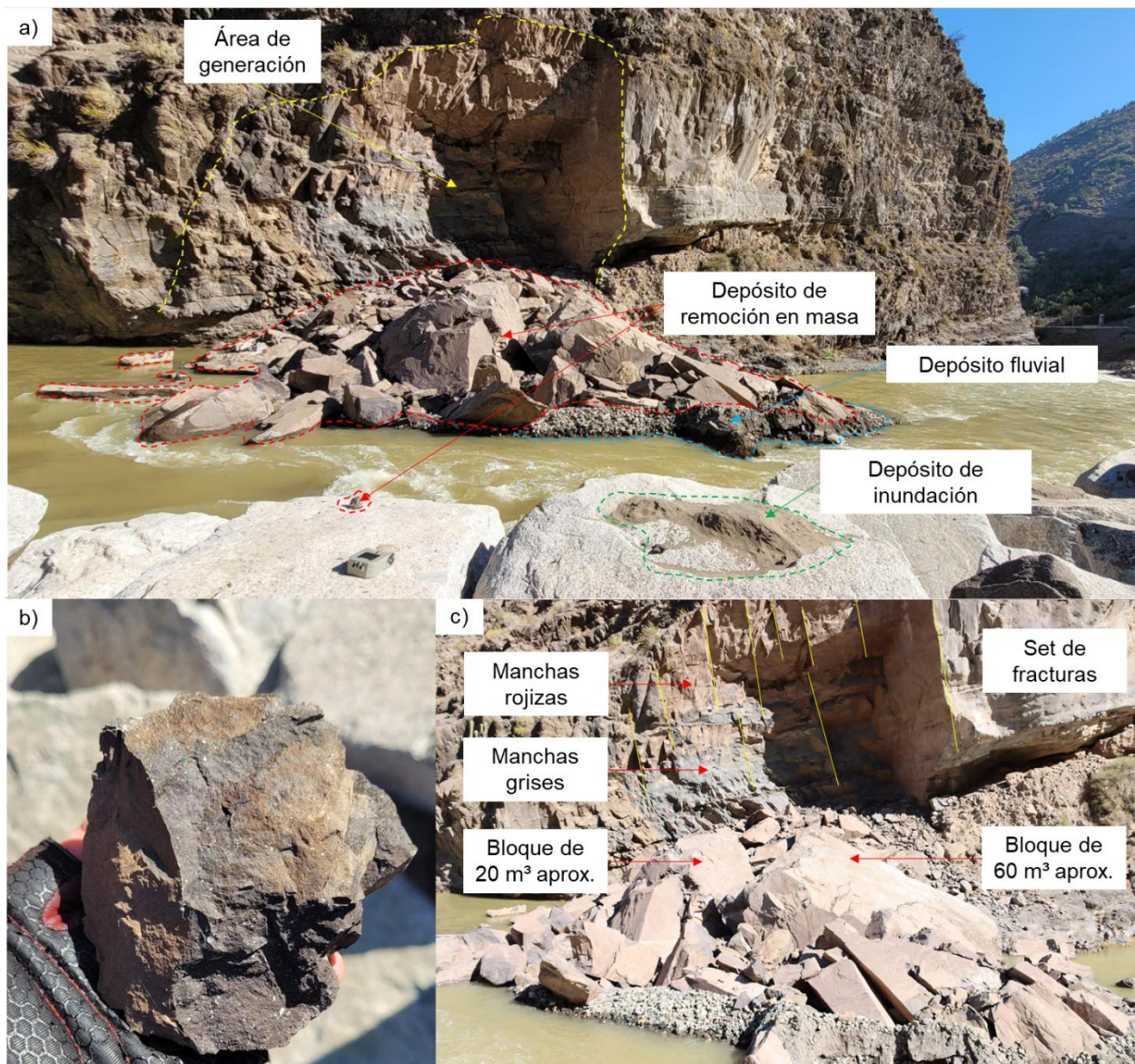


Fig. 8. Remoción en masa ocurrida en el sector puente El Jaboncillo. a) Vista general. b) Clasto proyectado. c) Set de fracturas y bloques de mayor tamaño.

5. LEVANTAMIENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO

El viernes 13 de mayo de 2022 se realiza un vuelo fotogramétrico en el área de estudio (Figs. 1, 9 y 10) para obtener las características topográficas del sector. Este vuelo se realiza con el vehículo aéreo no tripulado (UAV) Autel Evo II Pro Enterprise con la modalidad PPK (*Post-Processed Kinematic*) y, luego, se procesan las imágenes aéreas geolocalizadas con el *software* PIX4DMapper, obteniéndose un ortomosaico de las imágenes y un modelo digital de superficie (DSM) de 4 cm/píxel de resolución (Fig. 10).



Fig. 9. Equipo de cartografía del Departamento de Geología Aplicada de Sernageomin operando UAV Autel Evo II Pro Enterprise.

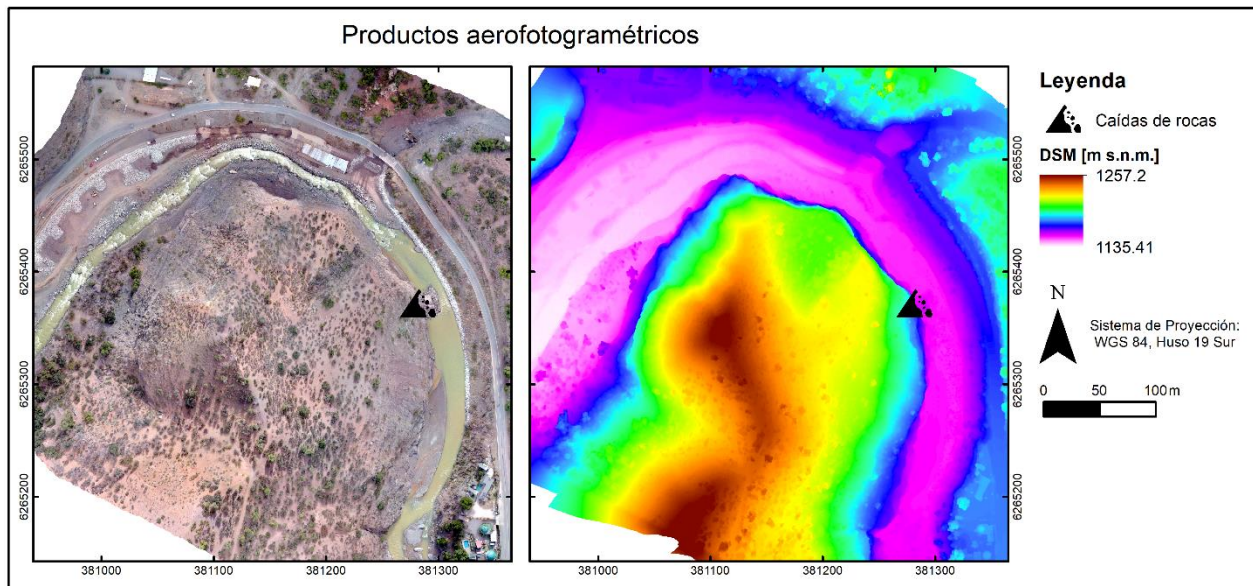


Fig. 10. Productos aerofotogramétricos del vuelo con UAV Autel Evo II Pro Enterprise modo PPK. Ortomosaico de imágenes aéreas y modelo digital de superficie (DSM).

Además, con el DSM se mide un volumen sobre el cauce de 130 m³ aprox., lo que se traduce en 340 ton. Adicionalmente se generan los subproductos de pendientes de ladera y de sombreado acotados al área de este estudio (Fig. 11).

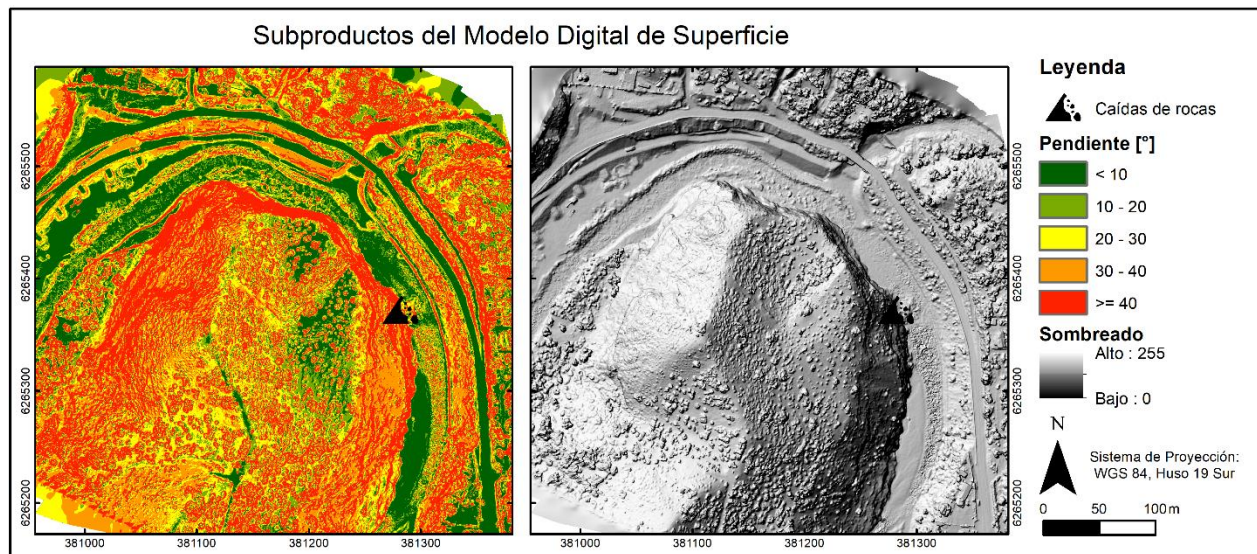


Fig. 11. Subproductos del modelo digital de superficie (DSM) pendientes de ladera y sombreado.

6. ANÁLISIS

A partir de las observaciones de terreno, se tienen evidencias para indicar que la remoción en masa se clasifica como caídas de rocas por colapso del macizo rocoso (Fig. 12), ya que el movimiento no es masivo ni del tipo flujo (Proyecto Multinacional Andino, 2007), no se observan estrías de cizalle en el área de generación, ni tampoco se reconoce un pivote de giro en la parte inferior del talud (Muñoz, 2018).

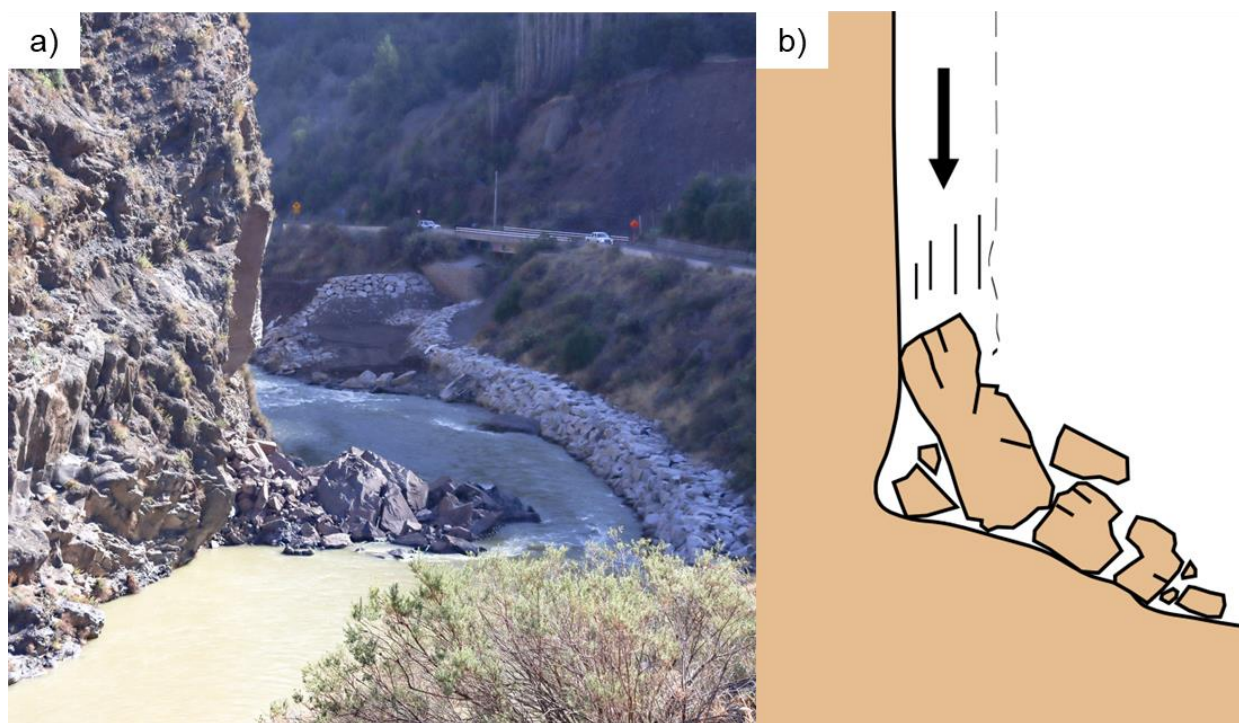


Fig. 12. Clasificación de la remoción en masa. a) Remoción en masa ocurrida. b) Esquema de caídas de rocas por colapso de macizo rocoso. Modificado de Proyecto Multinacional Andino (2007).

Los factores que condicionaron la ocurrencia de la remoción en masa corresponden principalmente a la configuración geológica y la pendiente del macizo rocoso. La presencia de un sistema de plegamiento, como el de la faja plegada y corrida del Aconcagua de la cual es parte el área de estudio, favorecen el desarrollo de fracturas (Fig. 13). En este sentido, es posible afirmar que la fractura sub-vertical con rumbo aparente de N10O (Fig. 8) está relacionada con el pliegue identificado por Moreno *et al.* (1991) (Fig. 2).

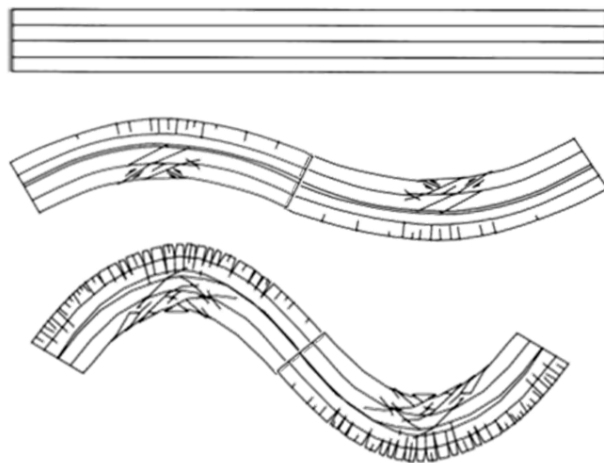


Fig. 13. Formación de fracturas asociadas a un sistema de plegamiento. Modificado de Matsuura *et al.* (2004).

Otro aspecto geológico relevante es la litología de la Formación Abanico que conforma el macizo rocoso. La diferente competencia de cada uno de los estratos permite la liberación de bloques en planos sub-horizontales. Sumado a esto el desarrollo de fracturas sub-verticales con rumbo N30E (Fig. 8), permiten la liberación total de bloques que se traducen en caídas de rocas (Fig. 14).

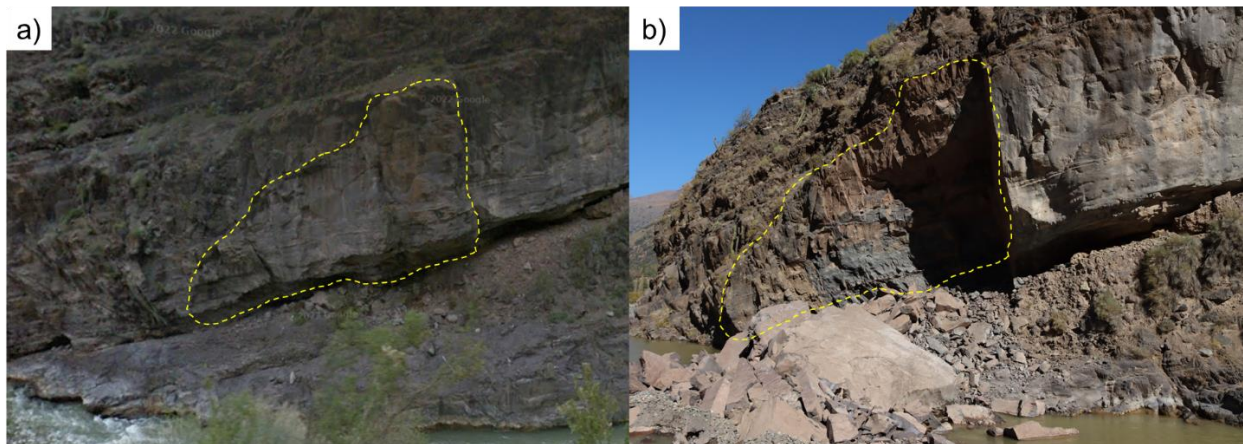


Fig. 14. El Antes y después del área de generación de la remoción en masa. a) Antes, septiembre de 2014 (Google Earth). b) Después 13-05-2022.

La pendiente del macizo rocoso también juega un rol fundamental en las caídas de rocas en el área de estudio, ya que según Lara (2007), estos procesos pueden generarse a partir de rocas fracturadas, meteorizadas o poco resistentes, en zonas donde los taludes son mayores o iguales a 40°, lo cual se corrobora en este estudio (Figs. 11 y 14).

Por otra parte, dentro de los factores desencadenantes más comunes de generación de caídas de rocas están la lluvia, los sismos y el deshielo, entre otros. Dada la inexactitud de la fecha de ocurrencia del evento y la escasa información disponible al respecto, no ha sido posible asociarlo a un desencadenante en particular, pero de todas maneras se analizan a continuación.

La estación meteorológica más cercana al área de estudio es San Gabriel (cod. 05704004-1) de la Dirección General de Aguas² (Fig. 1). Las precipitaciones más recientes previo a la remoción en masa que registra esta estación son entre el 26 y 27 de abril, que acumularon 23,6 mm, es decir, una semana antes del descubrimiento del evento, por lo cual, no es posible descartar su influencia como desencadenante de este. Tampoco hay registro de nieve para la altitud del área de estudio, por lo que se descarta el deshielo como detonante.

En cuanto a sismos, el último sismo percibido cerca del área de estudio previo al descubrimiento de la remoción en masa ocurrió el 4 de mayo a las 8 h, 48 km al SO de Los Vilos con una magnitud de 5,1 Mw y una intensidad de III Mercali en San José de Maipo, según el Centro Sismológico Nacional³ y la Onemi⁴, respectivamente. En este sentido, según Brantt *et al.* (2021) sismos de moderada intensidad (IV a VI) han generado caídas de rocas, por lo que, a pesar de que el sismo registrado es de intensidad III, no se puede descartar su influencia como desencadenante.

Por otro lado, al comparar el área de estudio entre septiembre de 2014 y el 13 de mayo de 2022, se da cuenta de la existencia del enrocado y de una plataforma de roca en la base del macizo rocoso que alcanza hasta 1/5 del perfil del río Maipo, lo que implica una estabilidad del sistema de drenaje en dicho periodo (Fig. 15).

² <https://snia.mop.gob.cl/dgasat/>

³ <https://www.sismologia.cl/sismicidad/informes/2022/05/149909.html>

⁴ <https://www.onemi.gov.cl/informate/sismo-de-mediana-intensidad-en-la-region-de-valparaiso-22/>

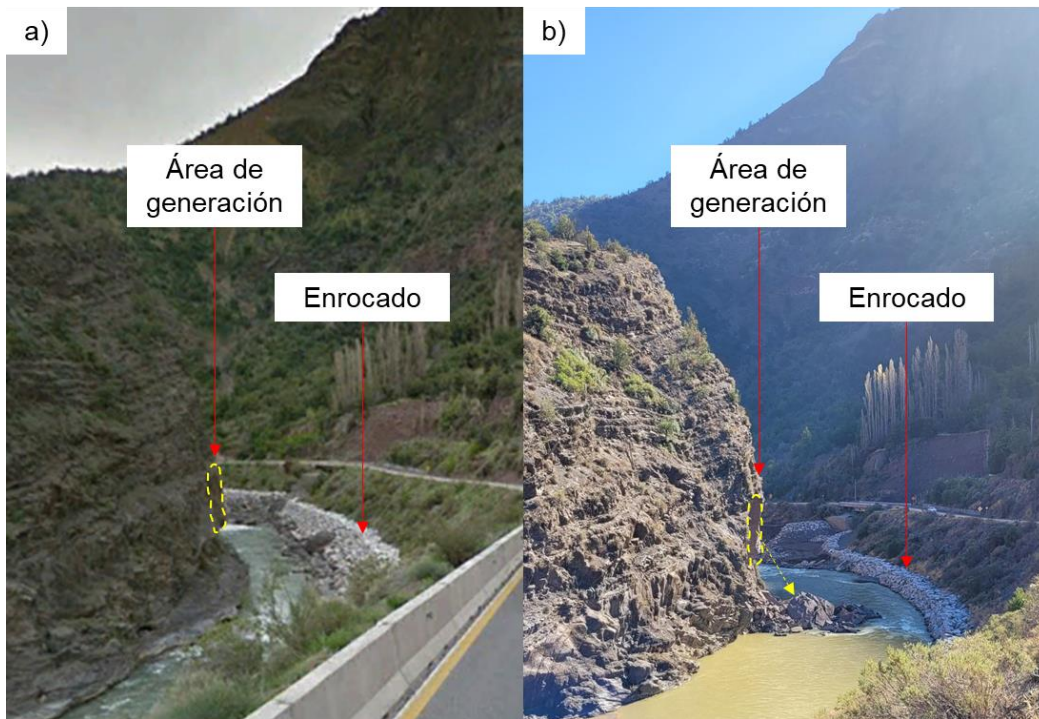


Fig. 15. El antes y después del macizo rocoso. a) Antes, septiembre de 2014 (Google Earth). b) Después, 13-05-2022.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto en este capítulo, se tiene que la configuración geológica-estructural del macizo rocoso implica que podrían ocurrir nuevas caídas de rocas y, en particular, nuevos colapsos si el plano de la fractura asociada a plegamiento se propaga hacia el NO (Fig. 16).

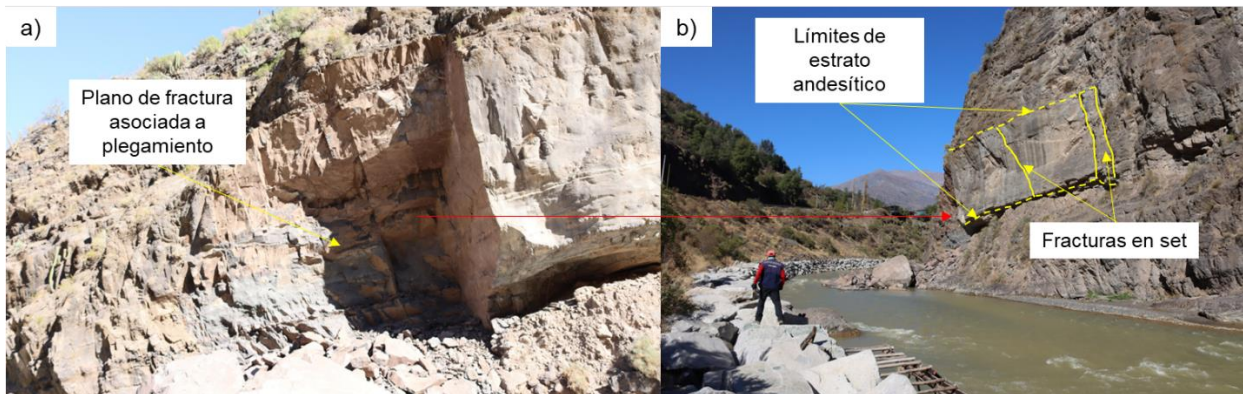


Fig. 16. Configuración geológica-estructural del macizo rocoso. a) Plano de la fractura asociada al sistema de plegamiento. b) Estratificación y set de fracturas que liberan bloques.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La remoción en masa informada el 6 de mayo de 2022 se clasifica como caídas de rocas, cuya fuente de generación es principalmente un estrato andesítico de la Formación Abanico. Los factores que condicionaron la ocurrencia de esta remoción en masa corresponden principalmente a la configuración geológica y la pendiente del macizo rocoso. En tanto, no se tienen evidencias suficientes para confirmar o descartar la influencia directa de lluvias o un sismo como desencadenantes.

Este depósito se emplaza sobre otro de origen fluvial correspondiente a una barra del río Maipo. Las caídas de rocas cubren 2/3 del perfil del río Maipo con un volumen estimado entre 130 y 150 m³ aprox., lo que implica una masa de 340 a 400 ton. Al comparar imágenes de 2014 y 13-05-2022 se reconoce en ambos momentos la existencia del enrocado y de una plataforma de roca en la base del macizo rocoso que cubre parte del perfil del río, lo que implica una situación de equilibrio del sistema fluvial en dicha sección, incluso en presencia de inundaciones.

En su situación actual el macizo rocoso es propenso a generar nuevas remociones en masa en presencia de factores desencadenantes, e incluso si el plano de la fractura asociada al sistema de plegamiento se propaga hacia el NO. En términos generales la ladera estudiada, y su extensión aguas abajo, es susceptible a generar caídas de rocas tipo colapso.

En virtud de lo anterior, se recomienda a la Dirección de Obras Hidráulicas y Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas lo siguiente:

- Monitorear periódicamente el macizo rocoso y en caso de la ocurrencia de eventos como los descritos en este trabajo informar a Sernageomin, con especial atención frente a eventos de lluvia, nieve, deshielo o sismos.
- Evaluar si el depósito de la remoción en masa cambia significativamente la configuración de equilibrio del sistema fluvial.
- No intervenir el macizo rocoso, ni la ladera, y remover el depósito de la remoción en masa sólo si desde el punto de vista fluvial, es estrictamente necesario. En tal caso, evitar utilizar herramientas que generen vibraciones mecánicas en el sector y de ser posible privilegiar solo la extracción de los bloques menores.

- Instalar señalética que advierta del peligro de remociones en masa del lugar. De ser necesario consultar a Sernageomin su opinión sobre la materia y la ubicación éstas.

Además, se recomienda que la autoridad competente restrinja el acceso al sector para actividades turísticas, tales como, rafting, escalada y trekking, entre otros. Sumado a lo anterior, se sugiere que el Servicio Nacional de Turismo (Sernatur) informe a las entidades que desarrollan actividades turísticas en la comuna sobre lo expuesto en este trabajo.

8. REFERENCIAS

- Báez, 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 de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología: 161 p. Santiago.
- Brantt, C.; Pantoja, G.; Muñoz, A. 2021. Peligro de remociones en masa en el sector sur de la región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-21-88: 107 p., 1 mapa escala 1:250.000. Santiago.
- Cruden, D.; Varnes, D. 1996. Landslide types and processes. In Landslides: Investigation and Mitigation (Turner, A.K.; Schuster, R.L.; editors). Transportation Research Board, National Research Council, National Academy Press, Special Report 247: 675 p. Washington D.C.
- Espinoza, L.; Marin, M.; Pantoja, G. 2019. Peligro de remociones en masa tipo flujo de la cuenca alta del río Maipo, región Metropolitana de Santiago. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR -19-72: 1 mapa en dos hojas escala 1:100.000. Santiago.
- Farías, V. 2019. Evaluación de peligro por caída de rocas en el sector del Embalse el Yeso, ruta G-455, comuna de San José de Maipo, región Metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería (Informe inédito). 18 p.
- Hauser, A., 1985. Flujos de barro en la zona preandina de la Región Metropolitana: Características, causas, efectos, riesgos y medidas preventivas. Revista Geológica de Chile No. 24, p. 75-92.
- Hungr, O.; Leroueil, S.; Picarelli, L. 2013. The Varnes classification of landslide types, an update. Landslides 11: 167-194.
- Jara, C. Alfaro, A. 2019. Evaluación de peligro por caída de rocas en el sector del Embalse el Yeso, ruta G455, comuna de San José de Maipo, región Metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería (Informe inédito). 18 p.

- Lara, M. 2007. Metodología para la Evaluación y Zonificación de amenaza de Remociones en Masa con Aplicación en Quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana. Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Geología: 212 p.
- Marín, M.; Garrido, N. 2012. Inspección técnica por derrumbe en vivienda de Av. El Carmen, comuna de San José de Maipo, región metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería (Informe inédito). 5 p.
- Matsuura, S.; Koto, S.; Cordero, M.; Álvarez, M.; Bahamonde, H. 2004. Risk investigation on sediment-related disasters in Punta Arenas, Magellan Region, Chile. *Journal of the Japan Landslide Society* 40 (5): 424-433.
- Moreno, H.; Thiele, R.; Varela, J. 1991. Estudio geológico de riesgo volcánico y de remoción en masa del proyecto hidroeléctrico Alfalfal II-Las Lajas. CHILE GENER: 74 p. Santiago.
- Muñoz, A. 2018. Metodología para evaluar la amenaza de flujos de detritos utilizando un análisis jerárquico de procesos y el software RAMMS, con aplicación en la cuenca del estero San Alfonso, región Metropolitana. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología: 105 p. Santiago.
- Muñoz, A.; Pérez, L.; Gálvez, V.; Sánchez, B.; Opazo, E. 2021. Remociones en masa y crecidas fluviales en la cuenca del río Las Minas de Punta Arenas, región de Magallanes y de la Antártica Chilena. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-21-91: 151 p. Santiago.
- Proyecto Multinacional Andino (PMA): Geociencias para las Comunidades Andinas. 2007. Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional 4: 432 p.
- Ramírez, P.; Garrido, N. 2012. Inspección técnica a la localidad de San José de Maipo, Región Metropolitana, por derrumbe en ruta G-25, km 51 e inestabilidad de macizo rocoso. Servicio Nacional de Geología y Minería (Informe inédito). 5 p.

Thiele, R. 1980. Geología de la Hoja de Santiago, región Metropolitana. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile 39: 51 p.,1 mapa escala 1:250.000. Santiago.

Varnes, D.J. 1978. Slope movement types and processes. In Landslides analysis and control (Schuster R.L.; Krizek R.J.; editors). National Academy Press, Transportation Research Board, Special Report 176: 9-33.

Villela, D., Sepúlveda, N. 2021. Efectos geológicos del sistema frontal del 29-31 de enero de 2021 en el segmento La Obra-Las Melosas, cuenca del río Maipo, región Metropolitana. Ruta G-25, G-465. Servicio Nacional de Geología y Minería (Informe inédito). 29 p.