

Síntesis Estudio Estado del Arte del debate sobre Minería y Glaciares en la Zona Central de Chile

Elaborado por Darío Trombotto

El presente documento es una síntesis de un estudio encargado por el Consejo Nacional de Sostenibilidad y Cuenta Pública de Anglo American con el propósito de contar con un estado del arte del debate científico sobre el impacto de la minería en los glaciares de la zona central de Chile. El estudio fue elaborado por Darío Trombotto, Geólogo, especializado en geocriología y geología del cuaternario

1. Contexto

Se entregó un conjunto de estudios y documentos que contienen las diversas posturas y argumentos que están en el debate sobre minería, glaciares y "glaciares" rocosos en la zona central de Chile, algunos corresponden a estudios científicos, otros son posturas que provienen de actores que, sin ser parte del mundo científico o académico, representan posturas e intereses importantes y con peso en la discusión del tema y en la opinión pública. Los puntos centrales de este debate tienen que ver con los efectos que tiene o puede tener la minería sobre los glaciares y "glaciares" rocosos, y las diversas formas en que puede generar esta afectación.

A partir del análisis de los documentos se espera obtener un panorama acerca de las principales posturas presentes en este debate, los argumentos que respaldan cada una de estas posturas y su fundamento científico.

Se busca identificar también aquellos aspectos del debate en que pueda existir más coincidencia o acuerdo entre los distintos estudios e investigaciones, y aquellos en que hay menor coincidencia o acuerdo.

Caracterizar los estudios realizados al respecto, de manera de conocer sus características y alcances, la solidez con que respaldan sus conclusiones.

2. Definiciones

En primera medida, hay que realizar una buena diferenciación entre glaciares *sensu stricto* y glaciares rocosos o de escombros, ya que ambos corresponden a ambientes diferentes y poseen comportamientos y propiedades físicas diferentes.

Mientras que los primeros son obra de un ambiente crio-hidrosférico, con un funcionamiento físico determinado por hielo, esto quiere decir que se forma y existe en lugares donde el agua se congela, en el caso de interés de este documento, en las montañas de la cordillera de los Andes de Chile central, su funcionamiento físico está determinado por el agua congelada, ya que es el hielo el componente principal que define su forma, movimiento y comportamiento.

Los segundos, los glaciares rocosos corresponden a ambientes periglaciales o criogénicos con permafrost, es decir, en zonas donde el suelo permanece congelado durante todo el año, zonas donde

las bajas temperaturas generan hielo y procesos de congelación, son un producto de un ambiente crio-litosférico, es decir, producto de la interacción entre el frío y los materiales del suelo (rocas, sedimentos), donde el agua sólida comparte el espacio con los sedimentos, con aire y puede que con agua también. Al estar compuesto por rocas, sedimentos y agua congelada, su forma movimiento y comportamiento es distinta a los glaciares, compuestos solo por hielo.

Veamos las definiciones que serían punto de partida de este interview.

Los glaciares, en el mundo, son cuerpos de hielo heredados como resultado de episodios fríos (criómeros glaciales) numerosos y reiterados en la historia geológica, desde hace por lo menos 3 millones de años, como en Islandia, donde el actual escenario glaciario con el presente tamaño, o semejante, llevaría más de 2000 años (Guðmundson, 2023). Durante los interglaciales o episodios cálidos los glaciares se redujeron o desaparecieron completamente.

Frecuentemente, por el tamaño, se define y asume que un glaciar es un cuerpo de hielo terrestre mayor de 10 ha. En realidad, esta definición está sujeta a que debe mostrar algún tipo de movimiento, o evidencia de deformación, a mediciones del ELA. Son características típicas, para corroborar, la presencia de Randkluft, crevasses, séracs, posible estratificación con sedimentos y/o foliación que es la diferenciación de capas de firnificación (metamorfosis de la nieve). Las velocidades monitoreadas en Islandia hoy, como ejemplo, son entre 10 cm hasta 2 m por día (Guðmundson, 2023). Por debajo de este tamaño muchos autores hablan de glaciarettes, que en primera instancia pueden ser el resultado de la reducción de un glaciar. Otra clasificación es por su ubicación, como por ejemplo de valle, de piedemonte, de circo, casquete o campo de hielo.

Los cristales de hielo en el glaciar, entre milímetros y centímetros, son muy comunes. Esto depende tanto de la edad del hielo, de la temperatura y la presión a los que están sometidos, como de las características internas del cristal, como impurezas (Lliboutry, 1964, 1965; Arena et al., 2007).

Algunas definiciones que se deben conocer por separado y de acuerdo a muchos autores son:

- Randkluft: Es una grieta que se forma entre el glaciar y la roca de la montaña, donde el hielo se separa de la superficie rocosa.
- Rimaya (Bergschrund): Grieta profunda, *quasi* horizontal y larga, que se encuentra en la parte superior del glaciar, producto de su movimiento pendiente abajo. La rimaya separa el hielo en movimiento de otro más delgado adherido al terreno, de movimiento débil, si la pendiente es por ejemplo de 45°.

- ELA (*Equilibrium Line Altitude*): Línea de equilibrio que depende del clima, de valor 0, entre la zona de acumulación y la zona de ablación de un glaciar, calculada anualmente.
- Crevasses: Son grietas de diferente origen que se observan en la superficie del glaciar. Son típicas las transversales (perpendiculares) al movimiento glaciario o las longitudinales, paralelas al mismo. Aparecen debido a las tensiones generadas por su movimiento. Los glaciares fluyen pendiente abajo, y cuando el hielo sufre fuerzas de tracción se forman grietas transversales. Si el hielo, en su parte terminal se extiende hacia áreas mayores se forman crevasses longitudinales. Las crevasses son muy peligrosas, varían en tamaño y profundidad, y se encuentran en áreas donde el terreno es irregular o cambia la pendiente. Hay crevasses marginales cuando hay diferencias de velocidades entre el centro y las márgenes del glaciar.
- Séracs: Un sérac es un bloque de hielo grande e irregular que se forma cuando varias crevasses se cruzan, creando fragmentos aislados de hielo. Estos bloques suelen encontrarse en zonas empinadas del glaciar, formando *icefalls* como si fueran “cascadas de hielo”, y son inestables, lo que puede representar un peligro si colapsan.
- Estratificación: Es cuando en los perfiles de hielo glaciario aparecen capas de sedimentos.
- Foliación: es una diferenciación de capas de firnificación, cuando entre las capas de hielo se distinguen cambios en su estructura cristalina y alta presencia de burbujas. La firnificación es el proceso de metamorfosis de la nieve a hielo, principalmente por compactación, y temperatura.

Los Glaciares rocosos, en cambio, son una geoforma criogénica con permafrost de montaña reptante que se mueve lentamente por la pendiente debido a la gravedad y por reptación y deformación del permafrost, particularmente si está sobresaturada en hielo (Corte, 1976 a y b; Haeberli, 1985; Barsch 1996; Trombotto Liaudat et al., 2014). Su estructura puede mostrar la existencia de hielo intersticial o hielo masivo de cristales pequeños, dependiendo de su edad, a no ser que sean de hielo glaciario heredado, que son grandes y se podrían diferenciar. Los glaciares rocosos se forman a partir de materiales como rocas, sedimentos y hielo que provienen de avalanchas o de glaciares ubicados en la cuenca superior. Estas avalanchas, llamadas avalanchas nivodetríticas, son deslizamientos de nieve mezclada con sedimentos (que caen por las laderas de montañas. Los glaciares rocosos o de escombros tienen formas lobadas o poseen forma de lengua.

No todos los glaciares rocosos se forman a partir de escombros de avalanchas. Los glaciares rocosos de origen glaciario se forman a partir de hielo y sedimentos glaciarios (till).

Por otro lado, glaciares cubiertos son glaciares blancos que tienen una capa de sedimentos en su superficie. La capa de sedimentos actúa como un aislante que ralentiza el derretimiento del hielo y por eso pueden existir a menor altura. Estos glaciares se consideran una continuación de los glaciares tradicionales, construyendo así un *continuum* de crioformas entre glaciares y glaciares rocosos, algunos autores llaman a este escenario “complejo glaciológico”.

La mezcla de estas crioformas en la literatura, o en los inventarios recientes tanto de Chile como de Argentina ha originado un *drift* conceptual erróneo que ha afectado la concepción y el resultado de muchos estudios, por ejemplo, cuando se intenta calcular el equivalente en agua de los cuerpos congelados sin una tecnología adecuada, no es lo mismo medir el equivalente de agua en glaciares que en glaciares rocosos.

En adelante, cuando se mencionan glaciares, nos referimos a aquellos compuestos principalmente por agua congelada (hielo), y glaciares rocosos a aquellos compuestos por rocas, sedimentos, y hielo de forma y ubicación heterogénea.

3. Retroceso de los glaciares

A. ¿Hay un retroceso acelerado de los glaciares?

Correcto. El retroceso de glaciares se refiere a la pérdida de hielo y la disminución del tamaño de los glaciares. Cuando un glaciar retrocede, significa que está perdiendo más hielo del que gana, lo que provoca la reducción de su volumen, largo o espesor.

Esta es un área en que existe consenso en la discusión científica y es un fenómeno que se observa a nivel mundial, no solo en Chile. Algunos estudios internacionales que dan cuenta de este retroceso acelerado en diferentes lugares del planeta y desde algún tiempo son: UNEP, 2017; Vuille et al, (2018); Gorin et al., 2024; World Glacier Monitoring Service, 2024 (<https://wgms.ch/global-glacier-state/>)

El retroceso de glaciares chilenos está documentado con varios ejemplos basados en casos particulares, principalmente son los trabajos que provienen del grupo de investigadores del Centro de Estudios Científicos (CECs) (por ejemplo, Rivera et al., 2000). Debería mencionarse que esta

información se basa en balances de masa glaciario¹. Sin embargo, se debe tener en cuenta muchos otros factores locales que influyen sobre el retroceso de los Glaciares, como exposición al sol, tamaño y condiciones meteorológicas (Rivera et al., 2016). Fundamental es investigar la precipitación, además de la temperatura y el fenómeno del Niño. Un tema *per se* es el de considerar el calor geotérmico en particular en zonas volcánicas como Chile (Trombotta Liaudat et al., 2014b) especialmente si se estudian paleo-temperaturas².

B. ¿Cuáles son las causas del retroceso acelerado de los glaciares?

i. Calentamiento global / Cambio Climático

A lo largo de la historia de la Tierra, ha habido episodios fríos que se pueden identificar claramente en las reconstrucciones paleoambientales, o en perforaciones y testigos de hielo, como los que se encuentran en los *inlandsis* (grandes extensiones de hielo que cubren más de un millón de kilómetros cuadrados). Sin embargo, en el periodo reciente, que ubicaríamos desde hace unos 4.200 años (la denominada edad Megalayiana), y después de un período frío llamado la “Pequeña Edad de Hielo” (que terminó alrededor de 1850, depende del lugar), se ha propuesto la idea de que la actividad humana ha comenzado a influir en el clima de la Tierra, contribuyendo al calentamiento global.

No se dice que los humanos hayan iniciado por sí solos estos cambios climáticos, pero sí que nuestras actividades pueden estar acelerando el calentamiento del planeta. Para frenar este proceso, es necesario que haya cambios en las actividades humanas, tanto a nivel local como global.

En cuanto al calentamiento global, en Chile, un estudio realizado por Rosenbluth y otros en 1997 había encontrado que para el periodo 1933- 1992 las temperaturas en el país aumentaron entre 1,3°C y 2,0°C por siglo. Además, este calentamiento ha sido más rápido en los últimos 30 años, especialmente en ciudades como Punta Arenas, Antofagasta y Punta Ángeles, donde la temperatura

¹ Los **balances de masa glaciario**, que son mediciones que permiten saber si un glaciar está creciendo o retrocediendo. Estos balances comparan cuánta nieve y hielo recibe un glaciar en un año (ganancia de masa) con cuánto hielo se derrite o se pierde en ese mismo período (pérdida de masa). Si un glaciar pierde más hielo del que gana, su balance de masa es negativo, lo que indica un retroceso.

² Las **paleotemperaturas** son las **temperaturas del pasado** de la Tierra, que se estudian a través de diversos métodos científicos.

ha aumentado hasta 3,8°C por siglo entre 1960 y 1992. Este incremento es más notable en las temperaturas mínimas.

Además, siguiendo la idea del calentamiento global, estudios realizados en los Andes Centrales de Chile han mostrado que los glaciares se están adelgazando, perdiendo aproximadamente 2,2 metros de espesor al año.

a. ¿Cómo afecta el calentamiento global/cambio climático a los distintos tipos de glaciares y "glaciares" rocosos?

El efecto sobre los glaciares es que los frentes glaciarios retroceden, y los cuerpos de hielo muestran adelgazamiento y pérdida de volumen de hielo. Por su parte, los glaciares rocosos, cuya dinámica depende del suelo congelado permanente (permafrost) pierden dinámica por reptación del permafrost, porque el suelo congelado deja de moverse como lo hacía antes. La nueva actividad en estos glaciares se encuentra muy relacionada con la presencia de agua y derretimiento sobre y dentro de la estructura congelada. Esto provoca un cambio en la forma en que se comporta el hielo, que antes era más sólido y compacto mientras que ahora aumenta su propiedad líquida. Por estos cambios circunstanciales se verán diseños particulares como estructuras de colapso y de desorden sedimentario atípico.

linteresantemente puede observarse que los tamaños y volúmenes de la masa glaciaria juegan un rol importante imprevisto al momento de considerar un índice de derretimiento (Gorin et al., 2024). En Perú, por ejemplo, cuerpos de hielo a mayor altura, pero pequeños muestran mayor sensibilidad al calentamiento global que lo más grandes a menor altura. Así mismo este análisis de glaciares en Perú llega a determinar que el retroceso, en la región estudiada sería el mayor del Holoceno (11,7-0 a). Temas que deberán ser profundizados.

ii. Depositación de material particulado sedimentable

Hay que considerar que las partículas llamadas “aerosoles” pueden estar en la tropósfera (la capa de la atmósfera más cercana a la tierra) o en la estratósfera (que es la capa de la atmosfera que se encuentra sobre la troposfera y bajo la mesosfera). Las partículas de origen local o regional en la tropósfera pueden, en algunos casos, pasar a la estratósfera debido a fenómenos atmosféricos.

En la estratósfera las temperaturas son extremadamente bajas (criogénicas), y predominan partículas que provienen de fenómenos naturales como las erupciones volcánicas. Sin embargo, estas partículas no tendrían un rol importante en el calentamiento cercano a la superficie de la Tierra (Flohn, 1985).

En la tropósfera, en cambio, las mismas partículas (como los sulfatos) pueden absorber radiación solar y reflejarla de vuelta en forma de calor, lo que puede contribuir al calentamiento cercano al suelo. Por otro lado, las partículas más grandes (mayores de 5 μm) también absorben radiación, tanto la radiación de onda corta (solar) como de onda larga (calor), y tienen diversos orígenes, son características de ambientes secos, ventosos y con erosión.

En partículas más pequeñas (menores de 1 μm), es más difícil separar entre las de origen antropogénico y las naturales. Algunos modelos sobre estas partículas pueden ser incorrectos si no consideran tanto la dispersión como la absorción de estas partículas y se enfocan solo en su composición físico-química (Flohn, 1985).

Un estudio de Arenson et al. (2015) encontró que cuando el grosor de los sedimentos sobre un glaciar es menor a 5 centímetros, se acelera el proceso de fusión del hielo (ablación), lo que puede aumentar el retroceso de los glaciares.

b. ¿Cómo afecta el depósito de material particulado sedimentable a distintos tipos de glaciares y "glaciares" rocosos?

El material particulado sedimentable (polvo y pequeñas partículas) proviene de diversas fuentes y se deposita tanto en los glaciares tradicionales (glaciares *sensu stricto*) como en los glaciares rocosos que contienen permafrost (suelo permanentemente congelado).

Cuando una cantidad importante de material particulado sedimentable (MPS) se acumula sobre la superficie blanca de un glaciar, esto reduce su albedo, que es la capacidad del glaciar para reflejar la luz solar. Al reducirse el albedo, el glaciar absorbe más calor, lo que acelera su derretimiento y degradación.

Sin embargo, el albedo es un proceso complejo. No solo depende de la capa superficial del glaciar, sino también de las capas de hielo subsuperficiales, ya que el glaciar no tiene una superficie completamente lisa, sino que es irregular.

A nivel regional, sin embargo, la variación natural del albedo se considera difícil de distinguir y se considera parte de las oscilaciones naturales (*in fide* Anglo American y Jaime Illanes y Asociados, Ítem VII, Adenda Complementaria, 2021). Por ejemplo, la nieve recién caída tiene un albedo alto (refleja mucha luz), mientras que la nieve antigua, que ha pasado por cambios (metamorfosis) durante el invierno, tiene un albedo bajo (refleja menos luz).

Como ejemplo, un panorama regional de glaciares como receptores de Material Particulado Sedimentable (MPS) para el año 2022 se ve en el cuadro de abajo en una zona cercana a Los Bronces:

Tabla V.3: Resultados de MPS en puntos receptores en Glaciares - 2022

RECEPTOR	MPS (mg/m ² -día)	
	Max Mensual	Media Anual
Paloma Norte	5	2
Paloma Oeste	6	2
Del Rincón	5	2
Altar	5	2
Infiernillo	14	6
La Perla	18	11
Los Machos	8	4
Monolito	8	3
Monolitos	9	3
Observatorio	11	4
Rinconada Oeste	7	3

Sin embargo, en la tabla se mezclaron glaciares *sensu stricto* con glaciares de escombros sin plantear cuál será la metodología a seguir, o qué implicaría un depósito de esta cantidad sobre los glaciares rocosos, porque se hizo.

De las zonas de monitoreo que pueden asociarse a los glaciares y glaciares rocosos, Farellones y Las Condes (Geoaire Ambiental SpA, 2024) se observa que:

- En Farellones, las máximas concentraciones de MP10³ ocurren (en las tardes) entre las 14:00 y 20:00 horas, y entre los meses de septiembre y abril, mientras que, Las Condes, el período diario de máximas concentraciones de MP10 es entre las 8:00 a 23:00 horas, además estacionalmente las máximas concentraciones de MP10 ocurren entre los meses abril a julio.

³ Tanto **MP10** como **MP2.5** forman parte del **material particulado sedimentable (MPS)**, son pequeñas partículas suspendidas en el aire. Estas partículas se clasifican por su tamaño:

- MP10: Son partículas con un diámetro de hasta 10 micrómetros (µm). Pueden provenir de fuentes como el polvo, la suciedad, la ceniza, y otras actividades humanas como la minería, el tránsito de vehículos o la construcción. Las partículas de este tamaño pueden ser inhaladas, y aunque la mayoría son filtradas por la nariz y garganta, algunas pueden llegar a los pulmones.
- MP2.5: Son partículas aún más pequeñas, con un diámetro de hasta 2.5 micrómetros (µm). Estas partículas son más peligrosas porque pueden penetrar más profundamente en los pulmones e incluso llegar al torrente sanguíneo. Proviene principalmente de la combustión, como los motores diésel, la quema de leña, o la actividad industrial.

- En cuanto a MP2.5, en Farellones, las máximas concentraciones ocurren en las tardes, principalmente entre julio y abril, mientras que, en Las Condes, el período diario de máximas concentraciones de MP2.5 es entre las 11:00 a 23:00 horas.
- Además, estacionalmente en Las Condes las máximas concentraciones de MP10 y MP2,5 ocurren entre los meses de abril a agosto.

Otros casos de recepción de MPS para la misma región, para comparación, se midieron en los sitios de monitoreo denominados Piedra Carvajal y Los Sulfatos. Mientras Piedra Carvajal muestra un valor de 28 mg/m²-día, en la estación Sulfatos la tasa es de 23 mg/m²-día. Los máximos son en enero y febrero, es decir en verano.

Tanto el valor de 200 mg/m²-día de depositación de MPS (Norma de Referencia Suiza de Protección a los Recursos Naturales), adoptado como umbral de afectación para la determinación del impacto ambiental significativo sobre glaciares descubiertos, como el valor de 20 mg/m²-día, adoptado para delimitar el área de influencia para la componente MPS, resultan adecuados al ser confrontados con los valores informados y no debieran afectar en gran medida el albedo de los glaciares blancos o *sensu stricto*.

El Material Particulado Sedimentable (MPS) en los glaciares rocosos no tiene un impacto significativo en su capacidad para reflejar la luz solar (reflectancia), lo que significa que no contribuye directamente a acelerar el derretimiento de estos glaciares como ocurre con otros tipos de glaciares.

Sin embargo, se debe prestar atención a los componentes químicos que forman parte de este MPS, ya que pueden ser lavados por el agua que fluye sobre el glaciar durante el deshielo anual. Esto ocurre en la capa activa de la crioforma, que es la capa sedimentaria superior del glaciar rocoso que se congela y descongela cada año.

Cuando el agua de deshielo fluye sobre la capa activa, puede llevar consigo esos componentes químicos, los cuales podrían entrar en el ciclo del agua (ríos, lagos, y aguas subterráneas). Esto puede tener un impacto en la calidad del agua de las cuencas cercanas al glaciar rocoso, ya que algunos de estos químicos pueden ser dañinos para los ecosistemas y la salud humana. Por eso es importante monitorear los tipos de partículas químicas presentes en el MPS y su posible entrada en el ciclo del agua. El MPS en los glaciares rocosos es irrelevante en cuanto a su influencia del cálculo de reflectancia, sí deberían monitorearse los tipos químicos de MPS que puedan entrar en el ciclo del agua a través lavado anual en la capa activa de la crioforma (Trombotto Liaudat et al., 2020).

c. ¿Qué responsabilidad tiene la minería sobre el MPS que se deposita en los glaciares?

En el caso de la minería, muchas de sus actividades producen MPS. Las partículas se generan por varias actividades como: Perforaciones y tronaduras (explosiones controladas), carga y descarga de materiales, transferencia de correa, movimiento de material/excavación, el funcionamiento de las plantas de chancado, que es donde el mineral se fragmenta en piezas pequeñas, la erosión causada por el viento (erosión eólica), el uso de maquinarias pesadas, combustión de motores de vehículos, maquinarias y grupos electrógenos, la nivelación y compactación del terreno, el tránsito constante de camiones que transportan mineral, residuos y suministros por caminos pavimentados y no pavimentados, además del movimiento de personal.

En el caso de Los Bronces se usan las guías de la autoridad ambiental chilena para monitorear y controlar la emisión de MPS. Algunos resultados informados (Geoaire Ambiental SpA, 2024) indican que las emisiones de material particulado en sus diferentes fracciones de MP (Material Particulado), MP10 y MP2,5, corresponden a 13.557 ton/año, 3.852 ton/año y 467 ton/año, respectivamente.

d. ¿Cómo afecta el MPS que se deposita sobre los distintos tipos de glaciares y "glaciares" rocosos a la calidad del agua que aportan a las cuencas?

Como se señaló más arriba, se debe monitorear la composición química del MPS, ya que, al depositarse sobre nieve y glaciares, puede entrar en el ciclo hidrológico. relacionada con las características del terreno en cada región. La geología (la estructura de las rocas y el suelo) y la litología (el tipo de rocas) de una zona pueden influir en el tipo de elementos presentes en el agua. Por esta razón, en algunas regiones, el agua puede contener elementos tóxicos que son dañinos para la salud humana si no se controlan adecuadamente (Trombott Liaudat et al., 2020, Sileo et al., 2020; Bearzot et al., 2023).

iii. Black Carbon

Black Carbon o carbono negro (BC) es el material negro hollín emitido por los motores de gasolina y diésel, las centrales eléctricas alimentadas con carbón y otras fuentes que queman combustibles fósiles. También por los incendios de grandes extensiones terrestres, muy importantes en Chile en los últimos años. Comprende una porción importante de partículas en suspensión o PM, que es un contaminante del aire (U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, 2011).

Químicamente es un componente del material particulado ($\leq 2.5 \mu\text{m}$ como diámetro aerodinámico).

a. ¿Cómo afecta el Black Carbon a los distintos tipos de glaciares y “glaciares” rocosos?

Cereceda-Balic et al. (2020, 2022) hipotetizan que el retroceso de algunos glaciares de los Andes Centrales de Chile se debe a la **contaminación por carbono negro (BC)** y **polvo**, los cuales oscurecen la nieve, reduciendo su capacidad de reflejar la luz solar (**albedo**). Esto provoca que la nieve absorba más energía solar, acelerando el derretimiento. Los autores sugieren que esta contaminación proviene principalmente de las **minas cercanas**.

Para sustentar esta hipótesis, compararon dos glaciares con características similares: el glaciar Alfa Olivares (OAG) y el glaciar Bello (BG) durante el periodo de 2004 a 2014. Utilizaron imágenes Landsat y midieron las concentraciones de BC en el aire y en la nieve para el año 2014. Los resultados mostraron diferencias importantes en el retroceso de los glaciares: por ejemplo: el Glaciar Alfa Olivares perdió el 27,6% de su área, mientras que el Glaciar Bello solo perdió el 5,1. Esto sugiere que el Glaciar Alfa Olivares se ve más afectado por el BC producto de las actividades mineras que el Glaciar Bello.

Los autores mencionados Cereceda-Balic et al. (2020, 2022) agregan también que, en el glaciar Olivares Alfa, elementos Cu y As estaban altamente enriquecidos, no así en el glaciar Bello, como así también la presencia de Fe que es un indicador de la erosión del suelo (y de la litología regional). Además, se afirma que, en ninguno de los días estudiados, las masas de aire “generadas” en Santiago alcanzaron los glaciares y no alcanzarían la zona por el efecto “altura de la montaña”. Los autores hipotetizan que el 82% es por la contaminación minera y el resto mucho más pequeño por el “cambio climático”. En los resultados muestran la distribución de partículas menores a 0.675 μm . Los autores no atribuyen mucha importancia a la mega sequía entre el 2010 y el 2021.

Sin embargo, algunos estudios ofrecen datos diferentes. Por ejemplo, **Gramsch et al. (2020)**, comprueban un transporte directo de carbono negro entre Santiago de Chile y la Cordillera de los Andes, específicamente a la estación de esquí La Parva, cercana a los glaciares. Según este estudio, el BC tarda aproximadamente 11 horas en verano y 9 horas en invierno en viajar desde Santiago hasta las montañas. La concentración de carbono negro en la montaña fue mayor en verano y menor en invierno. En el verano (por ejemplo, en diciembre) se estima que las emisiones de Santiago contribuyen con el 51% a las concentraciones en La Parva, mientras que las fuentes cercanas provenientes de actividades mineras y el transporte de larga distancia desde otras fuentes en el centro

de Chile contribuyen con el 37% y el 12% respectivamente. En invierno dominan las fuentes de larga distancia, las simulaciones de fuentes cercanas provenientes de actividades mineras y de Santiago dieron 25% para ambos casos.

Posteriormente también, otro trabajo que debilita la hipótesis de Cereceda-Balic et al. (2020, 2022) corresponde al trabajo de Lapere et al., 2021. Estos autores atribuyen hasta el 40% de la deposición seca de carbono negro en los Andes Centrales durante el invierno (julio) al viento proveniente del Área Metropolitana de Santiago. Los autores se han basado en modelos de transporte químico de alta resolución denominados WRF-CHIMERE. Los autores concluyen que grandes concentraciones de BC en el centro de Santiago coinciden en general con flujos de deposición débiles en el área objetivo y viceversa.

Según Hu et al. (2020), el carbono negro (BC) puede ser lavado de la superficie del glaciar durante la temporada de deshielo o por cambios de temperaturas superficiales del hielo. Sin embargo, el polvo sedimentario (partículas de polvo y tierra) tiende a permanecer más tiempo en la superficie. Esto hace que el polvo se convierta en un factor igual o incluso más importante que el carbono negro para tener en cuenta en el proceso de derretimiento del glaciar.

b. ¿Qué responsabilidad tiene la minería sobre el BC que se deposita en los glaciares?

La **minería** tiene responsabilidad en la producción de **carbono negro (BC)**, ya que es una de las fuentes que contribuye a su emisión. La responsabilidad sobre el BC que se deposita en glaciares requiere considerar diversas variables. El estudio de Thomas, JL, et al., 2019 analiza la interacción de los aerosoles de la tropósfera, aquellos que quedan en el aire son tan importantes como los que caen sobre los hielos y las nieve. Los autores enfatizan que estos aerosoles pueden recorrer largas distancias antes de depositarse, y su dispersión depende tanto del tamaño de las partículas (granulometría) como de los vientos y las condiciones atmosféricas.

Khang et al. (2020) señalan varias incertidumbres, al considerar el efecto del BC sobre el plateau del Tibet, por ejemplo. En este caso, se asoció el BC con una pérdida de un 20% de albedo durante el tiempo de derretimiento glaciar. Entre las áreas que requieren más estudio, los autores proponen investigar más a fondo la estructura del BC. Por ejemplo, algunas partículas de BC pueden estar recubiertas con otras sustancias, como sal, lo que cambia su color y afecta sus propiedades. También se ha encontrado que el BC puede coexistir con polvo mineral, lo que complica aún más su análisis.

Otro factor importante es el tamaño de las partículas de BC, ya que es otra fuente de incertidumbre en la estimación de las propiedades ópticas del BC, mediante las cuales se puede calcular el albedo inducido por el BC, y su papel como forzador de una variabilidad climática. Por último, se debe investigar mejor la relación diferencial del BC con respecto al tipo de nieve y tamaño del grano. Este tema se debería profundizar, y que no solo darían respuestas regionales, sino que sería un gran aporte científico global.

C. Impactos de la intervención minera sobre "glaciares" rocosos.

Qué nos dicen los estudios incluidos en el alcance del documento sobre:

i. Construcción de caminos sobre "glaciares" rocosos

a. ¿Qué impactos tiene sobre la estabilidad del glaciar rocoso?

La creación de un camino sobre un glaciar rocoso altera su estructura, ya que implica perturbar, cambiar y adelgazar la capa activa que cubre y protege el permafrost y hasta quizás modificar la parte superior del mismo. Este tipo de obra puede modificar el perfil de temperatura negativa (es decir, las temperaturas bajo cero) que es indispensable para que exista y se mantenga la crioforma (la estructura congelada del glaciar rocoso).

El permafrost, aunque su nombre sugiere que es permanente, no lo es. Tanto los cambios climáticos como las alteraciones naturales o provocadas por el ser humano pueden aumentar la temperatura del suelo y afectar su estabilidad (Washburn, 1979; Corte, 1997; Trombotto Liaudat et al., 2014). Los modelos que estudian la relación entre el permafrost y el sistema hidrológico (tanto superficial como subterráneo) son aún poco conocidos, lo que genera muchas dudas sobre su interpretación (Trombotto Liaudat et al., 2020; Navarro et al., 2023).

b. ¿Qué impactos puede tener la construcción de caminos sobre el derretimiento de glaciares rocosos?

Cuando se construye un camino sobre un glaciar rocoso, se altera el equilibrio térmico del suelo. El calor que proviene del ambiente exterior penetra por la capa activa hacia la parte superior del

permafrost (suelo permanentemente congelado), lo que provoca el descongelamiento de esta capa. Si el permafrost contiene hielo en su parte transicional con la capa activa, este se derretirá.

En zonas con permafrost, durante el verano, la capa superior del suelo se descongela temporalmente y se llama capa activa, sus límites son sumamente irregulares por la granulometría de los sedimentos que la componen. Esta capa se encuentra por encima del permafrost y se congela y descongela cada año (Trombotto Liaudat et al., 2014). Entre la capa activa y el permafrost puede haber una “capa de transición”, que actúa como un amortiguador y modera los cambios estacionales de un año a otro o por más tiempo. Esta capa puede observarse, por ejemplo, en fenómenos interpretados como ciclos de décadas (Trombotto & Borzotta, 2009).

La capa de transición, entre capa activa y permafrost, pueden ocurrir dos fenómenos. Si el permafrost se degrada (se descongela), la capa activa se vuelve más gruesa. Pero en periodos de frío y nevadas prolongados, esta capa puede contribuir a restaurar el permafrost en su parte superior (Trombotto & Borzotta, 2009).

El espesor de la capa activa juega un papel clave en el mantenimiento del permafrost. Un espesor mayor ayuda a conservar el permafrost, especialmente si el terreno tiene baja difusión térmica (es decir, transmite poco calor), como ocurre en rocas volcánicas del tipo de las riolitas (Trombotto & Borzotta, 2009). Un espesor mayor de 5 m de capa activa ocasiona que las variaciones anuales no lleguen a afectar el tope de permafrost (Trombotto & Borzotta, 2009), por lo cual se necesita más tiempo de influencia. Por el contrario, si la capa de cobertura es delgada y está compuesta de materiales como arena, se reduce el espesor de la capa activa, lo que acelera la degradación del permafrost (Wang et al., 2023).

La capa activa tiene una relación estrecha con la hidrología de las zonas frías (periglacial). Conociendo la temperatura de la capa activa se puede predecir el caudal de agua proveniente del deshielo de un área de montaña, como el que se origina en los frentes de los glaciares rocosos (Trombotto et al., 1999).

ii. Depósitos de lastre sobre "glaciares" rocosos

a. *¿Cómo afectan los depósitos de lastre sobre el aceleramiento, inestabilidad y posible colapso de glaciares rocosos?*

Brenning (2003) destaca que se han registrado altas velocidades en el movimiento de un glaciar rocoso con lastre antrópico (es decir, una sobrecarga de material creado por el ser humano), se

trataría del glaciar “Infiernillo” citando a Contreras e Illanes (1992). Sin embargo, se ha observado que, en muchos casos, los glaciares rocosos experimentan aumentos en su velocidad de movimiento incluso sin este tipo de lastre (i.e. Blöthe et al., 2020).

Se debería monitorear y comparar mejor glaciares rocosos locales, con y sin lastre, para evaluar la posible influencia de una sobrecarga de masa en su comportamiento. Monitoreos de zonas paralelas con y sin lastre sobre glaciares rocosos podría traer muy buena información científica sobre los efectos antrópicos de esta naturaleza.

b. Contaminación del agua almacenada en glaciares rocosos, por percolación de soluciones ácidas provenientes del depósito de lastre

Actualmente, no hay mucha información pública sobre cómo las soluciones ácidas de los depósitos de lastre (materiales residuales de actividades mineras o de construcción) podrían contaminar el agua almacenada en glaciares rocosos. Este es un tema que debería ser investigado más a fondo. Si estas soluciones ácidas no se congelan en el “glaciar rocoso” (ya sea de origen natural o pseudo geoforma artificial producto de las actividades mineras en ambiente periglacial), eventualmente, frente a un cambio térmico del suelo, se filtrarán a través de la capa activa del glaciar, que es la capa superior que se congela y descongela cada año. Como resultado, las soluciones ácidas podrían llegar al sistema hídrico regional o local, contaminando el agua de ríos, lagos o aguas subterráneas.

c. Degradación del permafrost e inestabilidad asociada a producción de calor asociada a percolación de soluciones ácidas

Según estudios científicos recientes, se sabe que la percolación de agua, (que podría ser soluciones ácidas) puede contribuir a la degradación del permafrost (el suelo permanentemente congelado) dentro de la estructura de un glaciar rocoso (crioforma). El líquido (ácido) que circula por el permafrost puede acelerar la erosión de los sedimentos congelados, lo que debilita la estabilidad de la zona.

Sin embargo, no hay suficiente información sobre cómo este tipo de percolación ácida afecta la temperatura en las áreas de contacto con el permafrost, o en la parte inferior de la capa de transición (la capa sensible que se encuentra entre el permafrost y la capa activa). El impacto térmico de esta interacción no ha sido estudiado a fondo, y sería un tema interesante para investigar en el futuro.

d. Efectos sobre el permafrost por compactación del material

El ambiente periglacial o criogénico, **no necesariamente cercano a glaciares *sensu stricto***, pero si con permafrost andino, es muy sensible a las actividades del hombre y como sistema natural tiene baja resiliencia lo que significa que le cuesta volver a su estado original una vez que ha sido alterado.

Brenning y Azócar (2010) mencionan que en la zona de Los Bronces hay una superficie de 1,9 km² de glaciares rocosos, de los cuales 0,8 km² están afectados: 0,4 km² por la remoción de material y depósitos de lastre, y otros 0,4 km² por la construcción de caminos y sondajes. Aunque se menciona más de un glaciar, no se especifica cuáles.

En un estudio anterior, Brenning (2003) destacó que se habían registrado altas velocidades de movimiento en un glaciar rocoso de la zona donde se había depositado lastre antrópico. Se trataría del “Infiernillo” citando a Contreras e Illanes (1992) con un depósito de lastre sobre el glaciar rocoso Infiernillo Sur. Sin embargo, como se señaló más arriba, este cambio de dinámica con velocidades altas se observa en muchos casos sin lastre y fue atribuido a la variabilidad climática (i.e. Trombotto Liaudat & Bottegat, 2019, Blöthe et al., 2020), por lo que es un fenómeno que requiere más investigación.

En un escenario de compactación de un glaciar de escombros, que contiene capas de hielo en su estructura, se puede causar el derretimiento del mismo por aumento de fricción del hielo con los sedimentos, lo que podría generar que salga más agua del cuerpo congelado. Para mantener el equilibrio, por termodinámica, el glaciar de escombros buscará restablecer el balance, como a través de succión de agua para ser nuevamente congelada e integrada al sistema. Pienso que este proceso es muy lento.

En otro escenario, un fenómeno cinético mayor parece deberse al cambio de la estructura del glaciar rocoso por descongelamiento, derretimiento y presencia de agua en la capa activa y en el intra-permafrost (parte interna de la crioforma) a causa del calentamiento global.

e. Degradación basal del permafrost de "glaciares" rocosos con depósito de lastre por efecto del gradiente geotérmico

No hay datos certeros respecto de este tema.

El espesor del lastre o material depositado influye sobre gradiente térmico y por ende en su dinámica. Si se deposita una capa de lastre sobre una crioforma como un glaciar rocoso, esta capa sedimentaria puede convertirse en una nueva capa activa (la capa que se congela y descongela estacionalmente) o

en parte de ella. Esto significa que la estructura del glaciar rocoso se modifica, y el perfil de temperatura dentro del glaciar intentará buscar un nuevo equilibrio. No se sabe con exactitud cuánto tiempo tomaría este proceso.

Es necesario analizar el nuevo espesor del glaciar después de que se haya agregado el lastre y generar un modelo que considere los posibles cambios en el gradiente de temperatura (la variación de temperatura en diferentes profundidades del glaciar rocoso). Por ejemplo, no sabemos si el espesor de un glaciar de escombros en su estado natural es el máximo que puede alcanzar. En los Andes, muchos glaciares de escombros tienen un espesor de varias decenas de metros.

En el caso de los glaciares *sensu stricto* (los glaciares de hielo puro), según Lliboutry (1964, 1965), existen:

- Glaciares fríos: son aquellos donde el hielo está siempre por debajo del punto de fusión, como los glaciares de Groenlandia y la Antártida, que son de gran tamaño.
- Glaciares temperados: en estos glaciares, el hielo está en el punto de fusión en todas partes. En estos casos, la presión de cientos de metros de hielo puede afectar la temperatura en la base del glaciar, pero este proceso es muy lento.

En Islandia (Guðmundson, 2023), por ejemplo, los glaciares son de este último tipo y en los monitoreos, a 30 m de profundidad, los hielos siguen mostrando temperaturas de 0 °C a lo largo del año.

Existen también glaciares politérmicos donde a lo largo del cuerpo de hielo se presentan los dos casos anteriores (Lliboutry 1964-1965).

iii. Remoción total o parcial de "glaciares" rocosos

La remoción total o parcial de glaciares rocosos ocasiona un cambio en el gradiente térmico local del suelo. Este proceso genera superficies irregulares o caóticas. Se pueden formar, por ejemplo, zonas con termokarst (áreas donde el terreno se hunde debido al derretimiento del hielo subterráneo), zonas de suffusión (áreas de hundimiento diferencial por descongelamiento subsuperficial) y crioturbaciones (movimientos diferenciales en las capas de suelos criogénicos) (Trombotto Liaudat et al., 2014).

Un ejemplo similar que vale se encuentra en la Antártida, aunque allí el ejemplo no se trata de permafrost reptante (como en los glaciares rocosos) sino de permafrost polar *in situ*. En la Base Marambio, la pista de aterrizaje para aviones fue frecuentemente modificada para mejorarla. Esto implicó que su capa activa fue removida, cambiada o retirada en varias ocasiones, lo cual traía como consecuencia los fenómenos señalados más arriba, sin que se encontrara una solución efectiva para este desafío de Ingeniería de ambientes fríos (ver Corte 1997).

Si un glaciar rocoso afectado por actividades humanas se encuentra en una pendiente pronunciada, es de esperar que se produzcan fenómenos catastróficos y erosión.

Si la pregunta se lleva a un glaciar *sensu stricto* la significancia de esa falta de hielo, en primera instancia, es traducible a un equivalente en agua líquida ausente. Interesante es saber, por otro lado, si la remoción incluyó la destrucción de la zona de acumulación de la nieve, donde con el tiempo se metamorfoza en firn y luego en hielo. Es decir, importante será si se produjo un cambio del paisaje. Como se dijo arriba un glaciar, o crioforma, es el resultado de una herencia pasada de muchos años, particularmente originadas en un criómero o episodio temporal frío. Como en este momento experimentamos un calentamiento global, es muy poco probable que un glaciar se reconstituya en el mismo lugar, más complejo y difícil aún será, por no decir improbable, si se lo quiere construir en otro como reemplazante.

D. ¿Cómo afectan a la estabilidad y desplazamiento de los glaciares las vibraciones producidas por las tronaduras, tránsito de camiones y maquinarias?

No se conocen referencias para este tema y sería muy importante de investigar en el futuro.

De todas maneras, un glaciar de escombros o rocoso constituye un ambiente dinámico que ha estado buscando un balance durante cientos a miles de años. Esto quiere decir que en una zona sísmica muy activa como son los Andes Centrales, estas crioformas han recibido constantes movimientos naturales (como temblores o terremotos). La crioforma (la estructura congelada del glaciar rocoso) que vemos hoy es la sumatoria de muchos procesos cinéticos (movimientos) que han ocurrido a lo largo del tiempo. Pienso, que por este pasado estos procesos no la deberán afectar demasiado, aunque las distancias pueden jugar un papel importante.

Esta hipótesis podía aplicarse también a un glaciar *sensu stricto*, siempre y cuando el cuerpo de hielo no esté cambiando demasiado rápido por el calentamiento global y estar originando sus propios procesos destructivos y peligrosos (surges, jökulhlaup o inundaciones glaciarias). Nuevas crevasses abiertas y profundas, variación de ELA, rimaya variable, etc., que son aquí observables podrían acelerarse en sus propios procesos por movimientos sísmicos de la cordillera, y por qué no acoplarse a una sumatoria con actividades humanas. Se sugeriría en estos casos llevar un monitoreo glaciológico.

Volviendo a glaciares rocosos, fenómenos sísmicos de alta intensidad son considerados por varios autores como procesos que pueden causar deslizamientos de partes (lóbulos) de glaciares rocosos o de la destrucción total de la crioforma, especialmente si se desplaza fuera del cinturón altitudinal periglacial andino (el área de gran altitud donde el suelo se mantiene congelado permanentemente). Deberíamos saber si este fenómeno se está incrementando por la naturaleza inestable de las crioformas debido a la variabilidad climática.

Dado que las vibraciones producidas por actividades humanas como las tronaduras, el tránsito de camiones o el uso de maquinaria también pueden generar movimientos, sería interesante compararlas con los efectos de los terremotos naturales. Esto permitiría desarrollar tablas de acción/reacción, que podrían ayudar a establecer límites sostenibles para evitar daños a los glaciares.

E. Cambios en la dinámica por extracción de agua de la interfaz glaciar/roca

Si es un glaciar rocoso, y bajo los efectos del calentamiento global, lo cual se puede verificar por su actividad y aceleración en el movimiento pendiente abajo, la extracción de agua del glaciar podría generar un efecto opuesto, es decir, podría hacer que el movimiento del glaciar disminuya. No se conocen referencias al respecto. Sin embargo, es importante verificar qué capa del perfil del glaciar rocoso se está analizando y/o modificando por extracción de agua.

Durante el verano, es común observar el paso del agua por la capa activa o parte superior del glaciar rocoso. Si nos referimos al agua que se mueve en el infra-permafrost (la parte más profunda de la estructura del glaciar rocoso) en contacto con el fondo de valle, o de la parte interna del mismo glaciar rocoso, lo más probable es que esa agua salga por el frente del glaciar, o zona de contacto entre la

crioforma y el fondo del valle o que el agua pueda seguir un curso subterráneo como acuífero subálveo (agua que fluye bajo el lecho del río).

Se debe considerar que hay una parte posible de agua subterránea del glaciar rocoso que se mueve como freática superficial o suspendida a poca profundidad, que termina más abajo en un cauce recolector. También hay que considerar que, por un cuerpo criogénico de este tipo, obturando un valle, cruza agua que proviene también de la capa activa de la cuenca superior que está afuera de la crioforma.

Para ser usada como agua potable necesita de estudios hidroquímicos para asegurarse que sea segura.

4. Aporte de los distintos tipos de glaciares y "glaciares" rocosos al agua de las cuencas durante el año.

Los caudales generados por el derretimiento de hielo glaciaro proveniente de los cuerpos de hielo mencionados por CECs (2017, *in fide* Anexo 2 3.11 Glaciares) varían entre 0 y 80 l/s, registrándose valores no nulos (es decir, cuando hay flujo de agua) entre noviembre y mayo, alcanzando su punto máximo en diciembre.

Otros ejemplos de caudales de la cuenca del río Mapocho de acuerdo a Marangunic et al. (2021) se observan en la figura siguiente:

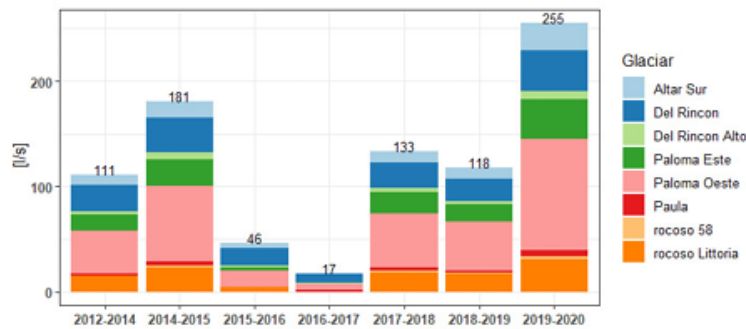


Figura 28. Caudal medio anual derivado del balance de masa geodésico.

Cuando se hacen cálculos hidrológicos de todos los glaciares rocosos, varios autores han obtenido resultados basados básicamente de la capa activa (la parte superior de la crioforma que se congela y descongela estacionalmente), dependiendo del índice de congelamiento y su espesor. Sin embargo, esto no es completamente confiable ya que no considera la capa de transición ni la degradación posible del permafrost por la variabilidad climática, tampoco los fenómenos criogénicos que ocurren anualmente. Se estaría investigando solamente la capa activa, la capa superior del glaciar rocoso que presenta variaciones en procesos anuales como crioturbaciones, es decir modificaciones de su superficie por extrusión o selección de sedimentos. Estos procesos son típicos de la capa activa, es decir, de la capa donde se producen los ciclos estacionales de congelamiento y descongelamiento. Estos fenómenos reflejan irregularidades topográficas normales asociadas a la propia dinámica periglacial, no capta todos los procesos profundos relacionados con el agua.

Por otro lado, varios autores tampoco consideran que la capa activa se puede comportar como un acuífero (una capa que puede almacenar o permite la circulación del agua subterránea) o parte como una acuiclusa criogénica o capa con una permeabilidad baja o capa de confinamiento de agua subterránea por el permafrost. Estos movimientos hídricos modifican la superficie del glaciar rocoso todo el tiempo. Por otro lado, como se ha señalado más arriba, el glaciar rocoso recibe aportes de agua de toda la cuenca superior, no solo del propio glaciar rocoso así que los resultados son dudosos al momento de involucrar solamente una crioforma como es el glaciar rocoso (Trombotto Liaudat et al., 2020; Halla et al., 2021).

Claramente, los cálculos hidrológicos de un glaciar rocoso se están haciendo con mediciones de caudales surgentes. Sin embargo, es importante diferenciar los distintos aportes y orígenes de estas

aguas, como la capa activa, el permafrost reptante (permafrost en movimiento) rico en hielo, el infra-permafrost (la parte más profunda), el permafrost in situ del valle y los manchones de nieve.

Si el glaciar rocoso es glacigénico), cuando su origen está relacionado con un glaciar *sensu stricto* ubicado en la cuenca superior, se debe incluir el aporte de agua de hielo derretido que proviene de la cuenca superior y utiliza diferentes caminos.

En síntesis, para los glaciares *sensu stricto* existen formas de medir y estimar los caudales que aportan a una cuenca con su balance de masa, así como para estimar el agua contenida en el glaciar o la reserva de agua que representa. Para el caso de los glaciares rocosos, no es posible aplicar las mismas mediciones o estimaciones para determinar el caudal que entregan a una cuenca, ni sus reservas, al estar compuesto por una combinación diversa de sedimentos congelados o no, hielo, aire y agua en diversas formas, en proporciones diversas y propias de cada glaciar rocoso, dichas estimaciones son muy complejas y tienen un alto margen de error.

Anexo Listado de estudios relacionados a Glaciares considerados en el estudio

nombre de la publicación	autor	tipo	fecha	observaciones
ANEXO GL-1 ESTUDIO DE GLACIARES LOS BRONCES. GLACIAR INFIERNILLO	Anglo American y GEOESTUDIOS	informe en contexto de EIA	25-05-2019	
ANEXO GL-2 LÍNEA DE BASE DE GLACIARES EIA DAND	Anglo American, ARCADIS y GEOTEST	informe en contexto de EIA	2017	
ANEXO GL-3 ESTUDIO DE GLACIARES LOS BRONCES. GLACIAR ALTAR SUR	Anglo American y GEOESTUDIOS	informe en contexto de EIA	27-03-2019	
ÍTEM VII PREDICCIÓN Y EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DEL PROYECTO O ACTIVIDAD ADENDA PROYECTO LOS BRONCES INTEGRADO	Anglo American y Jaime Illanes y Asociados	informe en contexto de EIA		Adenda, ver respuestas 511, 557, 572, 589, 596, 597, 618
ÍTEM VII PREDICCIÓN Y EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DEL PROYECTO O ACTIVIDAD ADENDA COMPLEMENTARIA PROYECTO LOS BRONCES INTEGRADO	Anglo American y Jaime Illanes y Asociados	informe en contexto de EIA		Adenda Complementaria, ver respuestas 160v, 167, 169, 170, 174, 175, 186, 233
ADENDA EXTRAORDINARIA RESPUESTAS AL INFORME CONSOLIDADO DE SOLICITUD DE ACLARACIONES, RECTIFICACIONES Y/O AMPLIACIONES COMPLEMENTARIO AL ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL DEL PROYECTO LOS BRONCES INTEGRADO	Anglo American y Jaime Illanes y Asociados	informe en contexto de EIA		Adenda Extraordinaria, ver respuestas 29, 35, 62, 63, 92, 143, 150, 152, 157, 158, 159
Antecedentes recursos de reclamación. Informe del Titular	Anglo American	informe en contexto de Reclamación	21-09-2022	Resumen en proceso de reclamación, ver páginas 44 a 83
La Importancia de los Glaciares de Escombros en los Sistemas Geomorfológico e Hidrológico de la Cordillera de Santiago. Fundamentos y Primeros Resultados	Alexander Brenning	Paper	01-07-2003	
Glaciares Chilenos. Reservas Estratégicas de Agua Dulce para la	Roxana Bórquez, Sara Larraín,	Informe	01-11-2006	Publicación de Chile Sustentable, con

sociedad los ecosistemas y la economía	Rodrigo Polanco y Juan Carlos Urquidi			apoyo de la Fundación Ford y de la Fundación Heinrich Böll
Importancia y monitoreo de glaciares rocosos en los Andes Chilenos	Alexander Brenning, Xavier Bodin, Guillermo F. Azócar y Fernanda Rojas	Poster	22-11-2009	
Minería y glaciares rocosos: impactos ambientales, antecedentes políticos y legales, y perspectivas futuras	Alexander Brenning y Guillermo F. Azócar	Paper	04-01-2010	
Variación temporal de las precipitaciones y caudales en la cuenca del Maipo, y la potencial influencia glacial en la producción de agua (1963-2006)	Roberto Pizarro, Cynthia Cabrera, Carolina Morales y Juan Flores	Paper	01-07-2011	
GLACIARES Y MINERÍA Continúa la Destrucción de los Glaciares	Chile Sustentable y Heinrich Böll Stiftung Cono Sur	Informe	07-02-2013	
El deslizamiento catastrófico del glaciar Aparejo: 35 años después	Felipe Ugalde, Gino Casassa, Cedomir Marangunic, Rodrigo Mujica y Cristian Peralta	Conference paper	01-10-2015	
Impactos de la minería sobre los glaciares en Chile	Chile Sustentable	Presentación al Congreso	16-05-2016	
Caracterización Glaciológica de Chile	Alexis Segovia Rocha y Yohann Videla Giering	Paper	01-07-2017	
Sobre la distribución de Glaciares Rocosos en Chile, análisis de la situación y reconocimiento de nuevas localizaciones	Francisco Ferrando	Paper	01-12-2017	
Glaciares rocosos en la zona semiárida de Chile: relevancia de un	Hans Fernandez y Francisco Ferrando	Paper	01-07-2018	

recurso hídrico sin protección normativa				
Estructura interna y evolución del glaciar rocoso Littoria en el estero de Yerba Loca, Chile central	Felipe Ugalde, Cedomir Marangunic y José Becerra	Abstract	18-11-2018	
El surge de 1947 en el glaciar Juncal Sur	Felipe Ugalde y Cedomir Marangunic	Poster	01-05-2019	
El dilema del agua, los glaciares y la minería. ¿Hasta cuándo?	Ladera Sur y Fundación Plantae	Nota	28-09-2019	
GLACIER RETREAT DIFFERENCES IN CHILEAN CENTRAL ANDES AND THEIR RELATION WITH ANTHROPOGENIC BLACK CARBON POLLUTION	Francisco Cereceda, María Florencia Ruggeri y Víctor Vidal	Paper	22-03-2020	
Black carbon transport between Santiago de Chile and glaciers in the Andes Mountains	Ernesto Gramsch, Alicia Muñoz, Joakim Langner, Luis Morales, Cristian Soto, Patricio Pérez y María A. Rubio	Paper	24-04-2020	
Pathways for wintertime deposition of anthropogenic light-absorbing particles on the Central Andes cryosphere	Rémy Lapere, Sylvain Mailler, Laurent Menut y Nicolás Huneeus	Paper	22-10-2020	
Glacier albedo reduction and drought effects in the extratropical Andes, 1986–2020	Thomas E. Shaw, Genesis Ulloa, David Farías-Barahona, Rodrigo Fernandez, José M. Lattus y James McPhee	Paper	17-12-2020	
Glaciares de la Región Metropolitana en riesgo de perder su hielo	Comunicaciones Departamento de Geología- FCFM	Nota	20-05-2021	Noticia sobre el paper "Glacier albedo reduction and drought effects in the extratropical Andes, 1986–2020"

De cobre, agua y glaciares en la metrópolis global. El nuevo papel de la mega minería en la gobernanza ambiental de Santiago de Chile	Solène Rey-Coquais	Paper	01-09-2021	
Capítulo 2- Glaciares en la cuenca alta del río Mapocho: variaciones y características principales	Cedomir Marangunic, Felipe Ugalde, Ashley Apey, Idoia Armendáriz, Martín Bustamante y Cristián Peralta	Capítulo de libro	01-12-2021	Libro: «Ecosistemas de montaña de la cuenca alta del río Mapocho», de Anglo American y CAPES UC
Velocidad superficial en el glaciar rocoso Aguada Los Machos utilizando feature tracking con Modelos Digitales de Elevación LiDAR	Cristián Peralta, Cedomir Marangunic y Felipe Ugalde (Geoestudios)	Poster	01-05-2022	
Variaciones recientes de glaciares en el estero de Yerba Loca, Región Metropolitana	Martín Bustamante y Felipe Ugalde	Poster	22-05-2022	
Understanding the role of anthropogenic emissions in glaciers retreat in the central Andes of Chile	Francisco Cereceda-Balic, María F. Ruggeri, Víctor Vidal, Lucas Ruiz y Joshua S. Fu	Paper	28-06-2022	
SUSCEPTIBILIDAD DE MOVIMIENTOS EN MASA DE ORIGEN GLACIAR EN LA CUENCA DEL RÍO VOLCÁN, REGIÓN METROPOLITANA	Felipe Ugalde	Tesis	01-06-2023	
GLACIARES DE LA CORDILLERA DE LOS ANDES: Impactos de la Minería	Raúl Cisternas Novoa	Informe	01-12-2023	Publicación de Greenpeace
¿Lo sabías? En la Región Metropolitana existen más de 1.200 glaciares	Greenpeace	Nota	15-05-2024	Nota sobre informe "GLACIARES DE LA CORDILLERA DE LOS ANDES: Impactos de la Minería"