

GLACIARES DE LA CORDILLERA DE LOS ANDES:

Impactos de la industria minera



// DICIEMBRE 2023

GREENPEACE

Elaborado por

Raúl Cisternas Novoa
Ingeniero Civil, especialista en Hidráulica
y Medio Ambiente

Edición general

Silvana Espinosa Yáñez
Dominique Charlin Videla

Diseño gráfico y diagramación

Pamela Ortega Campos

GREENPEACE

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. Introducción	4
2. Glaciares	6
2.1. Sistema terrestre: La Criósfera	7
2.2. ¿Qué es un Glaciar?	7
2.3. Relevancia de los glaciares	12
2.3.1. Contribución a la escorrentía	12
2.3.2. Reservas de agua dulce	13
2.3.3. Indicadores de cambio climático	14
2.3.4. Funciones ecosistémicas	14
3. Glaciares de La Cordillera de Los Andes	16
3.1. Andes tropicales	19
3.2. Andes meridionales o extra-tropicales	20
4. Industria minera y glaciares	26
4.1. Impactos de la industria minera en los ecosistemas glaciares	27
4.1.1. Disminución del albedo y aumento de la ablación por depositación de material particulado	27
4.1.2. Impactos reportados sobre glaciares de roca	29
4.1.3. Otros impactos	30
4.2. Experiencia internacional	31
4.3. Impactos reportados en glaciares chilenos	34
5. Caso de estudio: Glaciares de la cuenca del río Maipo	42
5.1. Estado actual de los glaciares en la cuenca del río Maipo	44
5.2. Proyecto de expansión minera Los Bronces Integrado	49
5.2.1. Descripción del proyecto según Estudio de Impacto Ambiental	49
5.2.2. Área de Influencia definida en el EIA – componente Glaciares	51
5.2.3. Análisis crítico Área de Influencia definida en el EIA – componente Glaciares	53
5.3. Glaciares no considerados en la evaluación ambiental del proyecto: relevancia de los glaciares del río Olivares y del estero Yerba Loca	60
6. Conclusiones	62
7. Bibliografía	64

1. INTRODUCCIÓN

La Cordillera de Los Andes se extiende desde los 10° de latitud norte hasta los 56° de latitud sur, aproximadamente, y contiene la mayor concentración de hielo del hemisferio sur fuera de la Antártida. Los glaciares en Los Andes cubren un amplio espectro altitudinal, desde cumbres que superan los 6000 m s.n.m. hasta el nivel del mar en Patagonia y Tierra del Fuego. Todas las estimaciones globales recientes sobre la contribución de los glaciares al aumento del nivel del mar colocan a los glaciares andinos dentro de los principales.

Particularmente, la cuenca del río Maipo contiene cerca de la mitad de toda la cobertura glaciaria de Los Andes Centrales chilenos. Las principales zonas glaciológicas se ubican en las cabeceras de las cuencas del estero Yerba Loca, del río Olivares, del río Colorado, del río El Volcán y del estero El Yeso. En los glaciares de la cuenca del Maipo convergen diferentes factores que favorecen su derretimiento. Estos factores pueden ser tanto de origen natural como de origen antrópico, a saber, cambio climático y el consecuente aumento de la temperatura y disminución de las precipitaciones, depositación de material particulado proveniente de faenas mineras, depositación de material particulado proveniente de la actividad industrial del Gran Santiago, destrucción total o parcial de glaciares durante las etapas de construcción y operación de faenas mineras, etc.

Estudios realizados a partir de mediciones remotas indican un balance de masa glaciaria regional promedio de -0.12 m w.e./año para los Andes Centrales, con una pérdida de masa total de 2.43 Gt para la cuenca del río Maipo entre 1955 y 2013. El balance de masa glaciaria más negativo fue el de la subcuenca de Olivares, con un valor medio de -0.29 m w.e./año. La respuesta anómala de los glaciares del Olivares es atribuible a la operación de faenas mineras en las cuencas contiguas (División Andina y Los Bronces). Estudios recientes han podido establecer que el impacto de la minería en el glaciar Olivares Alfa podría ser responsable del 82% de su retroceso total desde 2004 a 2014.

En este reporte se sintetiza el estado actual de los glaciares de La Cordillera de Los Andes y se entregan antecedentes técnicos que permiten evaluar la influencia que la industria minera ejerce sobre la dinámica glaciaria.

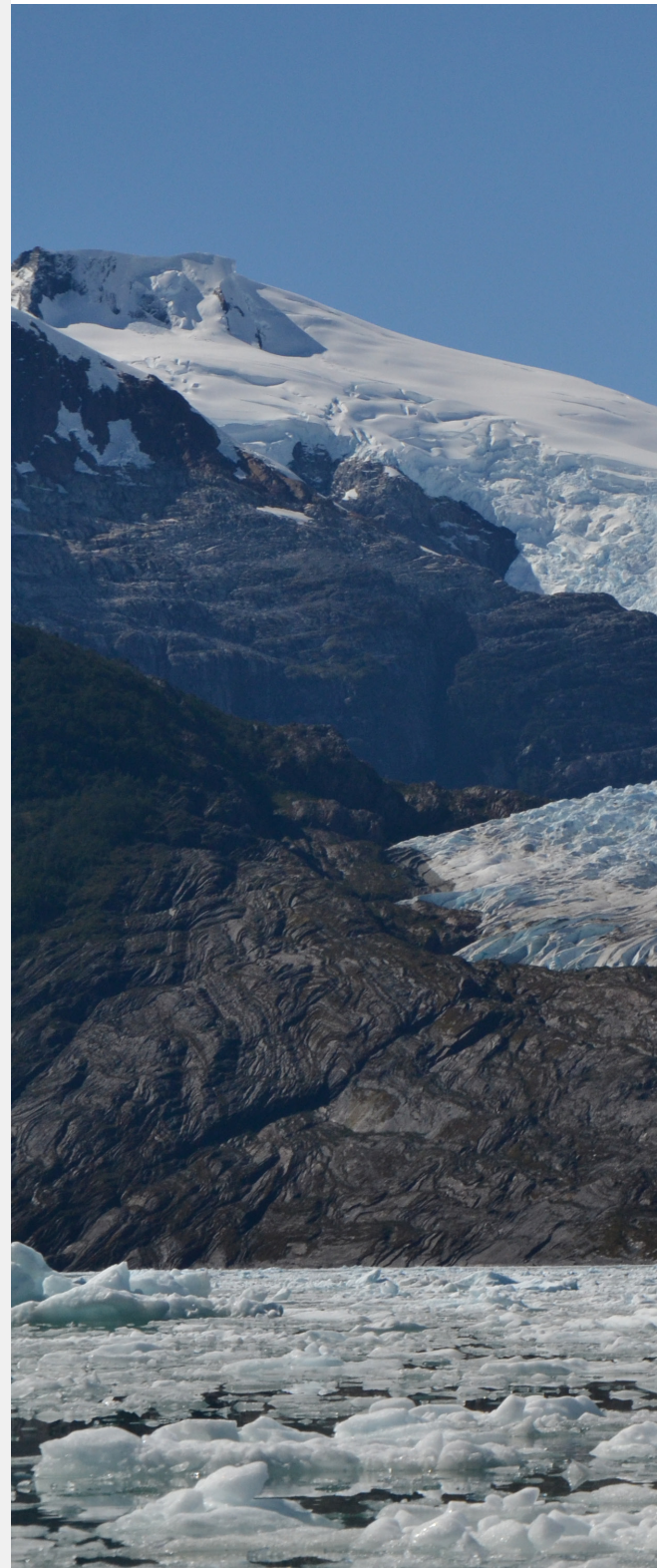


Figura 1. Campo de Hielo Sur. Andes Patagónicos (fuente: Raúl Cisternas Novoa).





GLACIARES

1. Sistema terrestre: La Criósfera

2. ¿Qué es un Glaciar?

3. Relevancia de los glaciares



GLACIARES DE LA CORDILLERA DE LOS ANDES.
IMPACTOS DE LA INDUSTRIA MINERA

// 2023

2.1. Sistema terrestre: La Criósfera

La criósfera es el subsistema terrestre integrado por todas aquellas regiones de la Tierra y océano donde el agua se encuentra en forma sólida, incluyendo hielo marino, hielo en lagos y en ríos, superficies con nieve, glaciares, casquetes de hielo y permafrost (CECs, 2016). Los glaciares, casquetes de hielo y plataformas de hielo flotantes son los componentes más importantes de la criósfera en términos de área y volumen. De acuerdo a las últimas estimaciones del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), estas tres componentes suman un área aproximada de 16.400.000 km², lo que representa cerca del 10% de la superficie de continentes e islas del planeta y un volumen equivalente en agua que podría aumentar el nivel del mar en cerca de 66 m (IPCC, 2013).

2.2. ¿Qué es un Glaciar?

Un glaciar es una masa de hielo que se origina en la superficie terrestre por compactación y recristalización de la nieve, mostrando evidencias de flujo en el pasado o en la actualidad. A lo largo de su perfil altimétrico, un glaciar se divide en dos zonas principales: una zona de acumulación, donde se produce ganancia neta de masa al cabo de un año hidrológico; y una zona de ablación, caracterizada por la pérdida de masa al final del período. La primera de ellas se desarrolla desde las nacientes hasta la Línea de Equilibrio Altitudinal, la cual representa los puntos del glaciar con balance de masa cero, debido a que los procesos de acumulación y ablación se igualan.

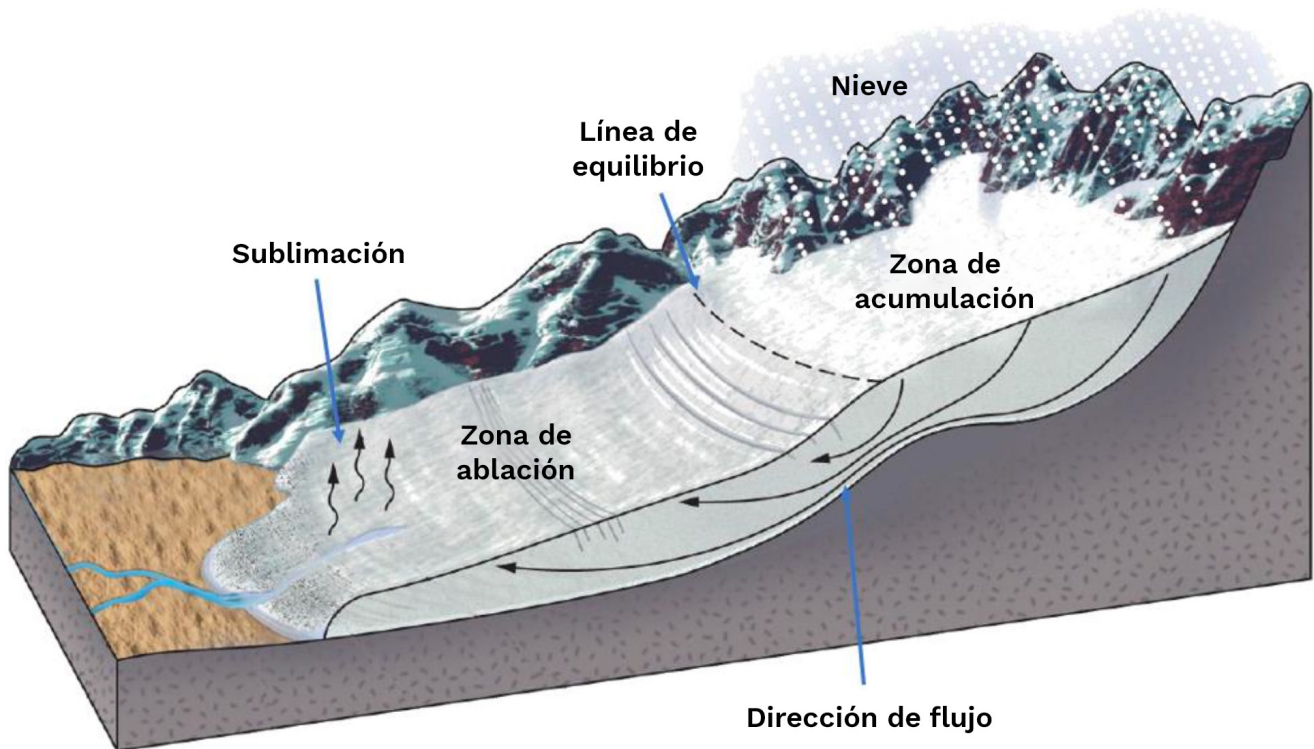


Figura 2. Relación de los distintos componentes del sistema glaciar (McGrath, 2017).

Desde el punto de vista morfológico, los glaciares pueden clasificarse en glaciares de piedemonte, glaciares de valle, glaciares de calota, campos de hielo, glaciares de cráter, glaciares de montaña, glaciares de circo, glaciares y glaciares rocosos.

Glaciares de piedemonte

Los **glaciares de piedemonte** son glaciares enclavados en la cordillera pero cuya alimentación es suficientemente abundante como para permitir que una lengua penetre el piedemonte en forma de abanico divergente (lóbulo). En Patagonia aún existen algunos ejemplos como el glaciar San Quintín, efluente del Campo de Hielo Norte.

Glaciares de valle

Los **glaciares de valle** se caracterizan por tener una o más zonas de acumulación, ubicadas en sub-cuencas o circos, las cuales confluyen en un valle (más largo que ancho) el cual permite el flujo de hielo hacia aguas abajo. No posee lóbulo y su frente queda circunscrito al valle. En Chile hay muchos ejemplos de glaciares de valle (e.g., glaciares Juncal Norte y Juncal Sur).



Figura 3. Ejemplo glaciar de valle. Glaciar Juncal Norte, Región de Valparaíso (fuente: Raúl Cisternas Novoa).

Glaciares de calota

Los **glaciares de calota** ocupan la cúspide de un centro montañoso. Estos glaciares tienen un abombamiento en la parte central, tipo domo, fruto de la acumulación y la topografía subyacente. Los más característicos de Chile son las calotas del volcán Osorno.



Figura 4. Glaciar de calota en Volcán Osorno (fuente: Raúl Cisternas Novoa).

Campos de hielo

Los **campos de hielo** son grandes superficies de hielo con una zona de acumulación compleja, compuesta por una planicie en altura o plateau y zonas escarpadas que la rodean y confinan. Todo el hielo de la zona de acumulación es evacuado por medio de varias lenguas efluentes, las cuales están controladas por la topografía subyacente. Casos emblemáticos en Chile son los Campos de Hielo Norte y Sur.



Figura 5. Ejemplo glaciar efluente en Campo de Hielo Sur. Glaciar O´Higgins, Región de Aysén (fuente: Raúl Cisternas Novoa).

Glaciares de cráter

Los **glaciares de cráter** son aquellos que ocupan una depresión topográfica rodeada de un cordón montañoso que impide la evacuación superficial del hielo acumulado, el cual fluye hacia el centro de la depresión y pierde masa por ablación superficial y, eventualmente, por calor geotermal. Un ejemplo en Chile es el glaciar de cráter en la caldera del volcán Sollipulli.

Glaciares de montaña

Los **glaciares de montaña** tienen formas variables y se ubican en las partes altas de la cordillera, donde la evacuación desde la zona de acumulación (más anchas que largas) se da por medio de una lengua glaciar pequeña en comparación con la de un glaciar de valle. En Chile hay variados ejemplos de glaciares de montaña (e.g., glaciar Tapado).



Figura 6. Ejemplo Glaciar de Montaña. Glaciar Tapado, Región de Coquimbo (fuente: Raúl Cisternas Novoa).

Glaciares de circo

Los **glaciares de circo** son aquellos que ocupan una depresión de carácter semicircular generada por erosión glaciar (circo), la cual está rodeada por flancos montañosos con mucha pendiente que culminan en cumbres o cordones tipo aretes.

Glaciares rocosos

Los **glaciares rocosos** son una masa de fragmentos o bloques de roca y materiales finos que existen en una pendiente, que pueden contener hielo interno, ya sea hielo intersticial o un núcleo de hielo macizo, y que muestra evidencias de flujo pasado o presente (e.g., Barsch, 1996; Trombotto *et al.*, 2014). Los glaciares rocosos (también llamados glaciares de roca o de escombros) poseen una morfología en forma de lengua o lóbulo y un escarpe frontal y lateral como resultados del desplazamiento lento ladera o valle abajo, presentando cordones y surcos en su superficie. La estructura interna de los glaciares rocosos está constituida por una mezcla de hielo (entre 40% y 60%) y material detrítico (Arenson *et al.*, 2002).



Figura 7. Ejemplo Glaciar Rocoso en las cercanías del glaciar Pirámide, Región Metropolitana (fuente: Raúl Cisternas Novoa).



Ambiente Periglacial

Para una adecuada comprensión de la dinámica glaciar es útil tener en consideración el concepto de ambiente periglacial. El sistema morfoclimático periglacial aparece en las zonas donde las temperaturas oscilan entre algunos grados bajo 0°C y 10°C. Etimológicamente, el concepto hace referencia a las vecindades de un glaciar. Sin embargo, las condiciones necesarias para la existencia de un sistema periglacial podrían darse aun sin la presencia de un glaciar, propiamente tal. Los climas en el que se encuentran estos sistemas morfoclimáticos periglaciales son las zonas continentales subárticas, el clima polar, la tundra y la alta montaña.

El ámbito periglacial comprende un piso periglacial, situado inmediatamente por debajo del límite de las nieves eternas en las montañas, y una zona periglacial que contornea los glaciares polares y en la cual el suelo permanece helado durante largos meses. Se calcula en un 15% la parte de las tierras emergentes que están intensamente modeladas por las acciones periglaciales. La gelivación reduce la roca a fragmentos sueltos, y la crioturación separa esos detritos y dispone los más gruesos superficialmente, en forma de polígonos, hileras, etc.

El ambiente periglacial incide directamente en la conformación y composición de un glaciar, ya sea modulando la acumulación y ablación de nieve/hielo, aportando material detrítico o permitiendo la proliferación biológica, por lo que su afectación tendrá repercusiones sobre la dinámica natural de un glaciar.



Definiciones político/ administrativas: caso chileno

Las múltiples formas que un glaciar puede adoptar según su contexto orográfico y latitudinal hacen que su definición sea compleja y controversial.

En la “Política de Protección y Conservación de Glaciares” la ex CONAMA (CONAMA, 2009) señala que un glaciar es: “Toda masa de hielo perenne, formada por acumulación de nieve, cualesquiera que sean sus dimensiones y sus formas”, y que “Los glaciares pueden presentar flujo por deformación, deslizamiento basal y/o deslizamiento de sedimentos subglaciales”. Y agrega que: “considera a estos como ecosistemas frágiles que requieren de un cuidado especial, por tratarse de procesos naturales estratégicos, y también como componentes del paisaje y fuente de recursos hídricos, susceptibles de un uso sustentable, siempre que se tomen especiales cuidados y restricciones en el uso y manejo, a objeto de satisfacer necesidades en beneficio del país, las comunidades locales, alledañas y las actividades productivas asociadas”.

La “Estrategia Nacional de Glaciares” (DGA, 2009) rescata la definición propuesta en 2001 por el tercer reporte del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), la que define Glaciar como una “masa de hielo terrestre que fluye pendiente abajo (por deformación de su estructura interna y por el deslizamiento en su base), encerrado por los elementos topográficos que lo rodean, como las laderas de un valle o las cumbres adyacentes; la topografía del lecho de roca es el factor que ejerce mayor influencia en la dinámica de un glaciar y en la pendiente de su superficie. Un glaciar subsiste merced a la acumulación de nieve a gran altura, que se compensa con la fusión del hielo a baja altura o la descarga en el mar”.

Alternativamente, con fines prácticos, la DGA propone una definición operacional que facilita el estudio de glaciares a partir de sensores remotos: “Toda superficie de hielo y nieve permanente generada sobre suelo, que sea visible por períodos de al menos 2 años y de un área igual o superior a 0.01 km² (una hectárea)”. Esto incluye, además, cualquier superficie rocosa con evidencia superficial de flujo viscoso, producto de un alto contenido de hielo actual o pasado en el subsuelo. Esta definición operativa solo considera glaciares con un área igual o superior a una hectárea, toda vez que éste es el tamaño mínimo de detección a partir del procesamiento de imágenes satelitales.



Inventario Público de Glaciares: caso chileno

Teniendo como base la definición operacional descrita en el párrafo anterior, en 2014 la DGA presentó el primer Inventario Público de Glaciares para Chile (IPG-2014) donde se contabilizó un total de 24.114 glaciares, correspondientes a una superficie de 23.641 km² de hielo. En 2022 la DGA presentó una actualización del Inventario Público de Glaciares (IPG-2022) informando sobre la pérdida de un 8% de la superficie total de glaciares. Sin embargo, el IPG-2022 muestra inconsistencias metodológicas con respecto al IPG-2014, dificultando su comparación directa. Entre las inconsistencias observadas se encuentra la unión de dos o más glaciares/polígonos; la asignación de nuevos códigos a glaciares/polígonos ya catastrados; la eliminación de glaciares/polígonos catastrados en 2014; y el cambio de código a glaciares/polígonos catastrados en 2014. Además, en el IPG-2022 se observan inconsistencias en la delimitación del área de acumulación de algunos glaciares, por lo que a partir de una comparación directa con el IPG-2014 se podría concluir erróneamente que estos glaciares estarían “creciendo” hacia aguas arriba.

2.3. Relevancia de los glaciares

2.3.1. Contribución a la escorrentía

Los glaciares presentes en zonas montañosas juegan un rol fundamental en la regulación hídrica de las cuencas y son un factor importante en el abastecimiento humano en regiones con grandes densidades poblacionales y que frecuentemente se ven enfrentadas a períodos de escasez hídrica. A nivel mundial, se estima que 140 millones de personas viven en zonas en las que el agua de deshielo glaciar aporta, con carácter estacional, al menos el 25% de la escorrentía (Schaner *et al.*, 2012). Lamentablemente, debido al calentamiento atmosférico global, la mayoría de los glaciares de la Tierra retrocedieron durante el siglo XX (Zemp *et al.*, 2019) y continúan haciéndolo, por lo que se espera que el aporte de agua de deshielo glaciar a la escorrentía varíe en las próximas décadas (Bliss *et al.*, 2014; Huss y Hock, 2018; IPCC, 2020).

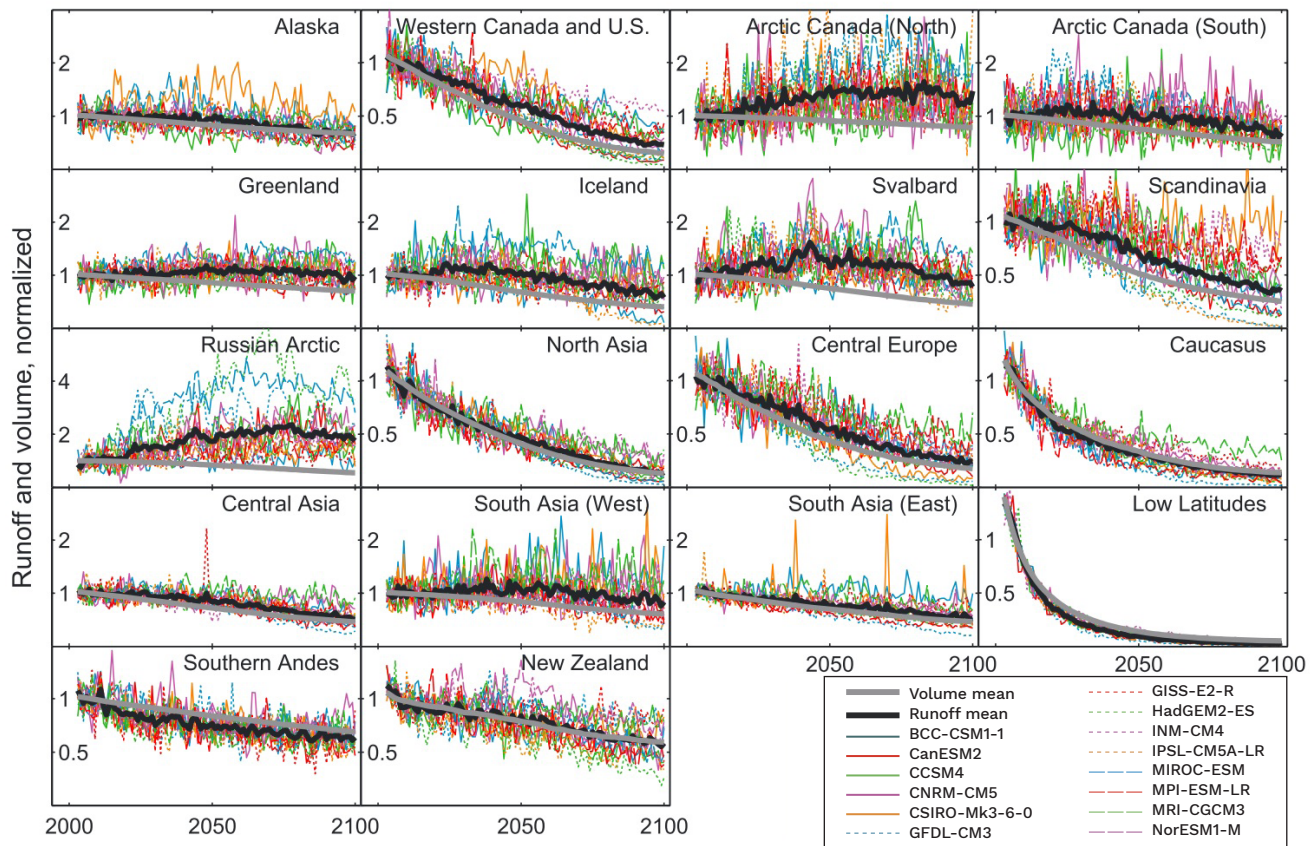


Figura 8. Proyección anual de la escorrentía glaciar normalizada según zona glaciológica (período 2003-2100). En cada zona se muestra la escorrentía total según diferentes modelos climáticos globales (fuente: Bliss *et al.*, 2014).

Cuando un glaciar está en retroceso continuo se produce un aumento temporal de los caudales de deshielo hasta alcanzar un máximo en el largo plazo (Gleick y Palaniappan, 2010; Baraer *et al.*, 2012). Luego de esta fase transitoria los caudales comienzan a disminuir debido a la reducción paulatina del hielo disponible para la fusión (Jansson *et al.*, 2003). Los estudios a escala global muestran una gran heterogeneidad en la distribución geográfica de la ocurrencia de estos máximos. Se espera que varias cuencas en el Himalaya y Alaska aumenten su escorrentía glaciar debido a una mayor tasa de ablación en las próximas décadas, alcanzando su máximo en algún momento del siglo XXI. Otras regiones del mundo, como los Andes semiáridos, Europa central y el oeste de Canadá alcanzaron un máximo regional durante el siglo XIX y, por lo tanto, los caudales de deshielo glaciar seguirán disminuyendo en las próximas décadas (Bliss *et al.*, 2014; Huss y Hock, 2018).



Contribución a la escorrentía: caso andino tropical

El aporte a la escorrentía de los glaciares de Los Andes Tropicales es especialmente importante, ya que las zonas montañosas se encuentran muy pobladas y engloban algunos importantes centros de población, como Cuzco en Perú, y La Paz y El Alto en Bolivia. Pese a que las ciudades de mayor tamaño prestan gran atención a las infraestructuras de almacenamiento de agua, en el actual contexto de escasez hídrica el aporte del deshielo glaciar ha aumentado su importancia relativa como amortiguador en los últimos años. Por ejemplo, una estimación de la contribución máxima mensual del agua de deshielo glaciar al suministro de agua disponible durante un año normal permitió constatar que ésta contribuía aproximadamente el 5% del suministro de agua disponible en Quito (Ecuador), el 61% en La Paz (Bolivia) y el 67% en Huaraz (Perú), mientras que durante un año de sequía la contribución máxima mensual al suministro de agua disponible aumentaría la dependencia hasta aproximadamente el 15% en Quito (Ecuador), el 85% en La Paz (Bolivia) y el 91% en Huaraz (Perú) (Buytaert *et al.*, 2017).



Contribución a la escorrentía: caso chileno

Chile es un país montañoso donde el 70% de la población se abastece del agua proveniente de las zonas cordilleranas. DGA (2015) y Ayala *et al.* (2016) elaboraron un modelo de derretimiento que mostró que durante un año seco el aporte de los glaciares Bello, Yeso y Pirámide a la cuenca del estero El Yeso - principal fuente de agua potable del Gran Santiago - fue de $42 \pm 8\%$ y $67 \pm 6\%$ de la escorrentía anual y estival, respectivamente. En 2020 Ayala *et al.* extendieron el análisis a toda la cuenca del Maipo, encontrando que durante el período 1955-2016 el deshielo glaciar representó el $16 \pm 7\%$ y $59 \pm 23\%$ de la escorrentía anual y estival, respectivamente.

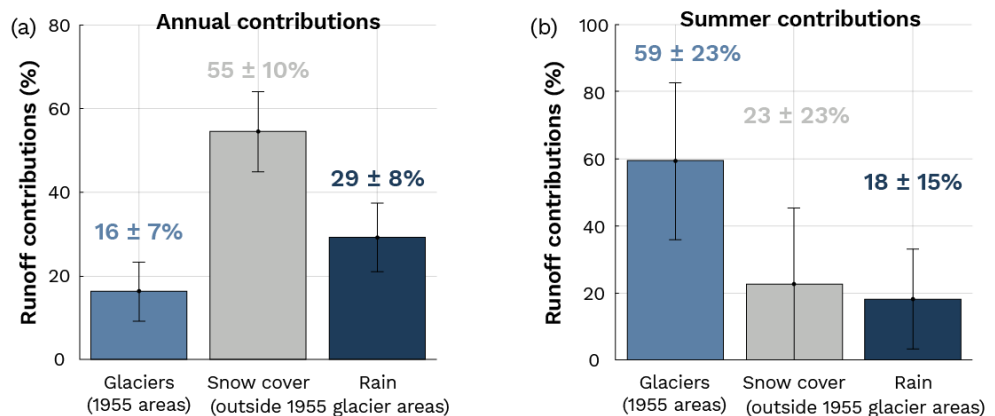


Figura 9. Contribución de los glaciares, nieve y lluvia a la escorrentía del río Maipo (período 1955-2016). La barra de error indica la variabilidad interanual (fuente: Ayala *et al.*, 2020).

2.3.2. Reservas de agua dulce

El concepto de glaciares como “reservas de agua dulce” abarca diferentes procesos y escalas de tiempo. El almacenamiento de agua a largo plazo se refiere al almacenamiento de hielo y nieve en forma de glaciares, proceso que ocurre a escala de años, siglos o milenios. A esta escala, el almacenamiento de agua afecta el nivel del mar y el equilibrio hídrico de las cuencas glaciares, cuya contribución hídrica es especialmente importante en zonas áridas y semiáridas.

El hielo de los glaciares contiene el 75% del agua dulce disponible en la Tierra (IPCC, 1996), del cual el 99,5% está contenido en los casquetes de hielo (Antártica y Groenlandia). Los glaciares, propiamente tal, contienen una parte muy pequeña del agua dulce congelada.



Glaciares rocosos como reservas de largo plazo

La importancia relativa de los glaciares rocosos como reservorios de agua varía entre las diferentes zonas de alta montaña del mundo, según la abundancia de estas formas y la magnitud de la glaciación actual. En regiones montañosas áridas y semiáridas de La Cordillera de Los Andes, especialmente en sectores cordilleranos del norte y centro de Chile y Argentina, la importancia como reservorios de agua naturales se acrecienta debido a la presencia de una gran cantidad de glaciares rocosos de diversas formas y tamaños (Trombotto *et al.*, 1999; Azócar & Brenning, 2010). Los glaciares rocosos pueden almacenar más agua que los glaciares “blancos”, como es el caso de Chile entre los 29° a 32°S (Azócar & Brenning, 2010).



Almacenamiento a mediano plazo: variaciones estacionales de la escorrentía

En invierno los glaciares almacenan grandes volúmenes de precipitaciones que se liberan con el deshielo estival. Esto produce una pronunciada estacionalidad en la descarga. La relación entre la escorrentía estival y la escorrentía total aumenta considerablemente con el incremento de la cobertura glaciar. Al comparar la escorrentía de cuencas sin glaciares y cuencas con cobertura glaciar, Pertziger (1990) concluyó que la máxima contribución a la escorrentía en las cuencas sin glaciares precede a las cuencas con cobertura glaciar, es decir, el peak de la escorrentía estacional se retrasa con el aumento de la cobertura glaciar (Meier y Tangborn, 1961; Stenborg, 1970). Fountain y Tangborn (1985) mostraron que este retraso es de aproximadamente un mes si la cobertura glaciar aumenta de 0 a 7%, y solo de unas dos semanas si la cobertura glaciar aumenta del 50 al 100%.

El retardo que los glaciares inducen sobre el peak del derretimiento de la capa nival suprayacente es particularmente relevante en zonas áridas y semiáridas con vocación agrícola, donde la demanda de agua para riego aumenta en el período de estiaje.

2.3.3. Indicadores de cambio climático

Aunque la mayoría de los glaciares del mundo están retrocediendo desde principios del siglo XVIII, cuando finalizó el período de frío conocido como la pequeña edad de hielo (Vuille *et al.*, 2018; Zemp *et al.*, 2015), el rápido retroceso experimentado por los glaciares andinos en los últimos tiempos ha estado vinculado al cambio climático antropogénico (Marzeion *et al.*, 2014). Los glaciares son indicadores sensibles del cambio climático ya que responden con rapidez a los cambios de temperatura y precipitaciones. El rápido retroceso de los glaciares tropicales se considera uno de los indicadores más visibles del calentamiento de la Tierra (Vuille *et al.*, 2008). El grado de retroceso del glaciar varía, pero los glaciares pequeños son los más vulnerables y muchos de los glaciares andinos ya han desaparecido.

2.3.4. Funciones ecosistémicas

Los glaciares juegan un rol esencial en la dinámica natural, especialmente en la continuidad de los cursos de agua, por lo que también influyen en los ciclos ecológicos de los ecosistemas bajo su influencia, además de representar un bienestar general para la población, dado que estos cuerpos de hielo ofrecen variados beneficios tanto de provisión, de regulación y beneficios culturales. Estos beneficios se denominan funciones ecosistémicas y toman cada vez más relevancia debido a la merma ambiental acelerada que los glaciares han sufrido en las últimas décadas, presumiblemente debido a los cambios atmosféricos, como el aumento de las temperaturas y la baja en las precipitaciones (Segovia, 2014).

Dentro de las funciones de provisión-regulación de los glaciares se puede destacar la entrega de estabilidad hídrica a los ecosistemas naturales, así como también de seguridad al abastecimiento humano de recursos hídricos para desarrollar todo tipo de actividades. Además, es relevante la función ecosistémica de almacenamiento de agua, la cual se configura como un buen capital natural que otorga tranquilidad para los periodos de sequía. Asimismo, dentro de las funciones culturales, la función ecosistémica de turismo y recreación se configura como uno de los más relevantes, puesto que mueve a grandes masas de personas a visitar sitios de dominio glaciar.

Las funciones ambientales de los glaciares rocosos son similares a aquellos de los glaciares blancos (Kronenberg, 2009). Entre las funciones relacionadas a su valor de uso, están principalmente su uso como fuente de agua, su contribución a la regulación del clima, su contenido de información sobre el pasado geológico y climático (Barsch, 1996; Brenning, 2005), y su apreciación en el turismo (Parks Canada, 2008). A ello se agrega el valor no relacionado al uso, como el de su existencia, de legado y altruista (Kronenberg, 2009).



GLACIARES DE LA CORDILLERA DE LOS ANDES

1. Andes tropicales

2. Andes meridionales o extra-tropicales



GLACIARES DE LA CORDILLERA DE LOS ANDES.
IMPACTOS DE LA INDUSTRIA MINERA

// 2023

3. Glaciares de La Cordillera de Los Andes

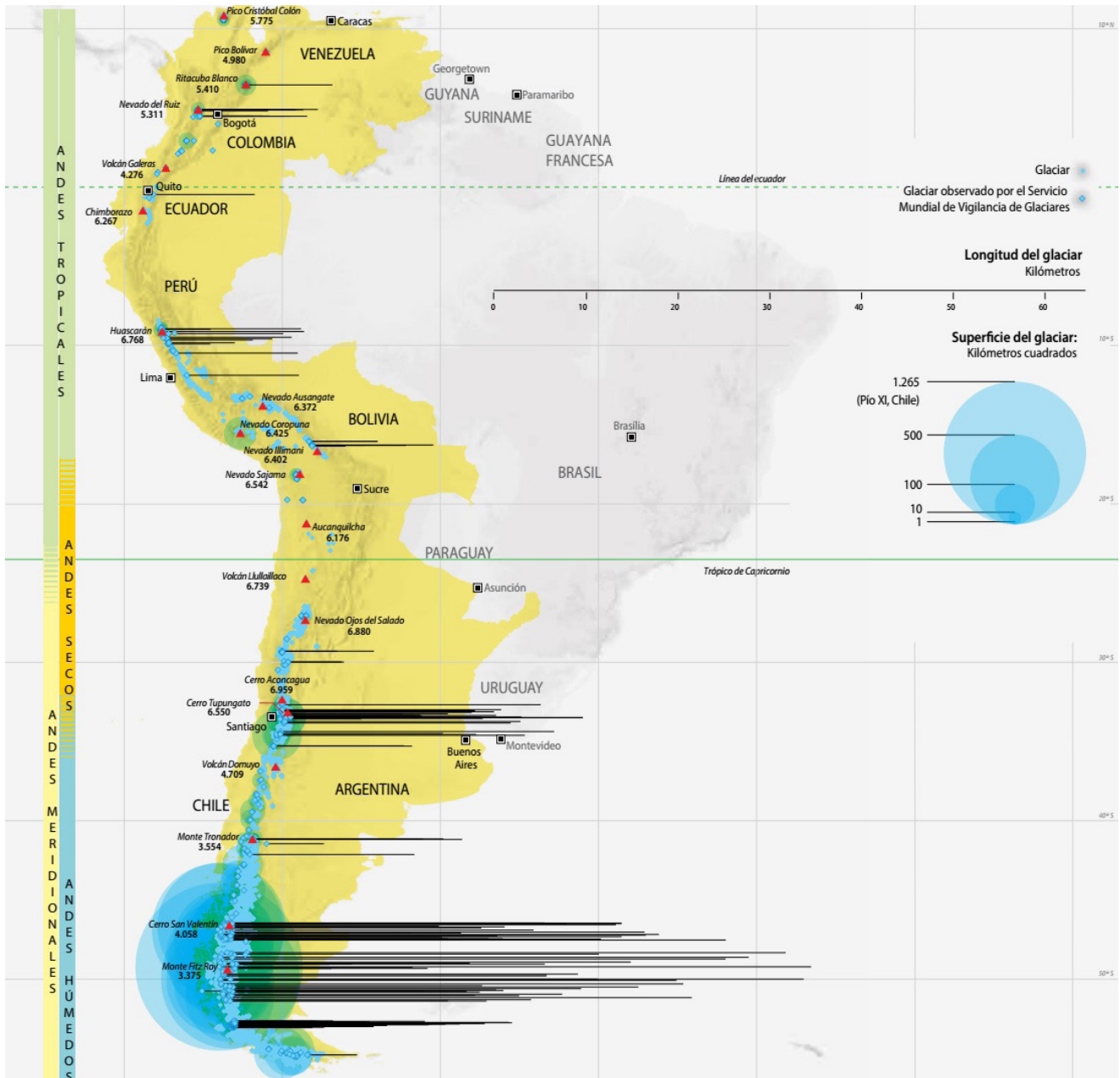


Figura 10. Glaciares de la Cordillera de Los Andes (Unesco, 2018).

La Cordillera de Los Andes se extiende desde los 10° de latitud norte hasta los 56° de latitud sur, aproximadamente, y contiene la mayor concentración de hielo del hemisferio sur fuera de la Antártida. Los glaciares en Los Andes cubren un amplio espectro altitudinal, desde cumbres que superan los 6000 m s.n.m. hasta el nivel del mar en Patagonia y Tierra del Fuego. Todas las estimaciones globales recientes sobre la contribución de los glaciares al aumento del nivel del mar colocan a los glaciares andinos dentro de los principales. Esta región experimentó las mayores pérdidas de masa específica acumuladas desde 1961 (Dussaillant *et al.*, 2019).

Para comprender la dinámica de los glaciares de Los Andes, resulta útil clasificarlos en base a criterios climáticos y latitudinales: (i) glaciares de Los Andes Tropicales, ubicados en Venezuela, Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia y el norte de Chile; y (ii) glaciares de Los Andes Meridionales o extra-tropicales, ubicados en Chile y en Argentina. Estos últimos, a su vez, pueden dividirse en dos sub-zonas climáticas: Andes secos y Andes húmedos o patagónicos.

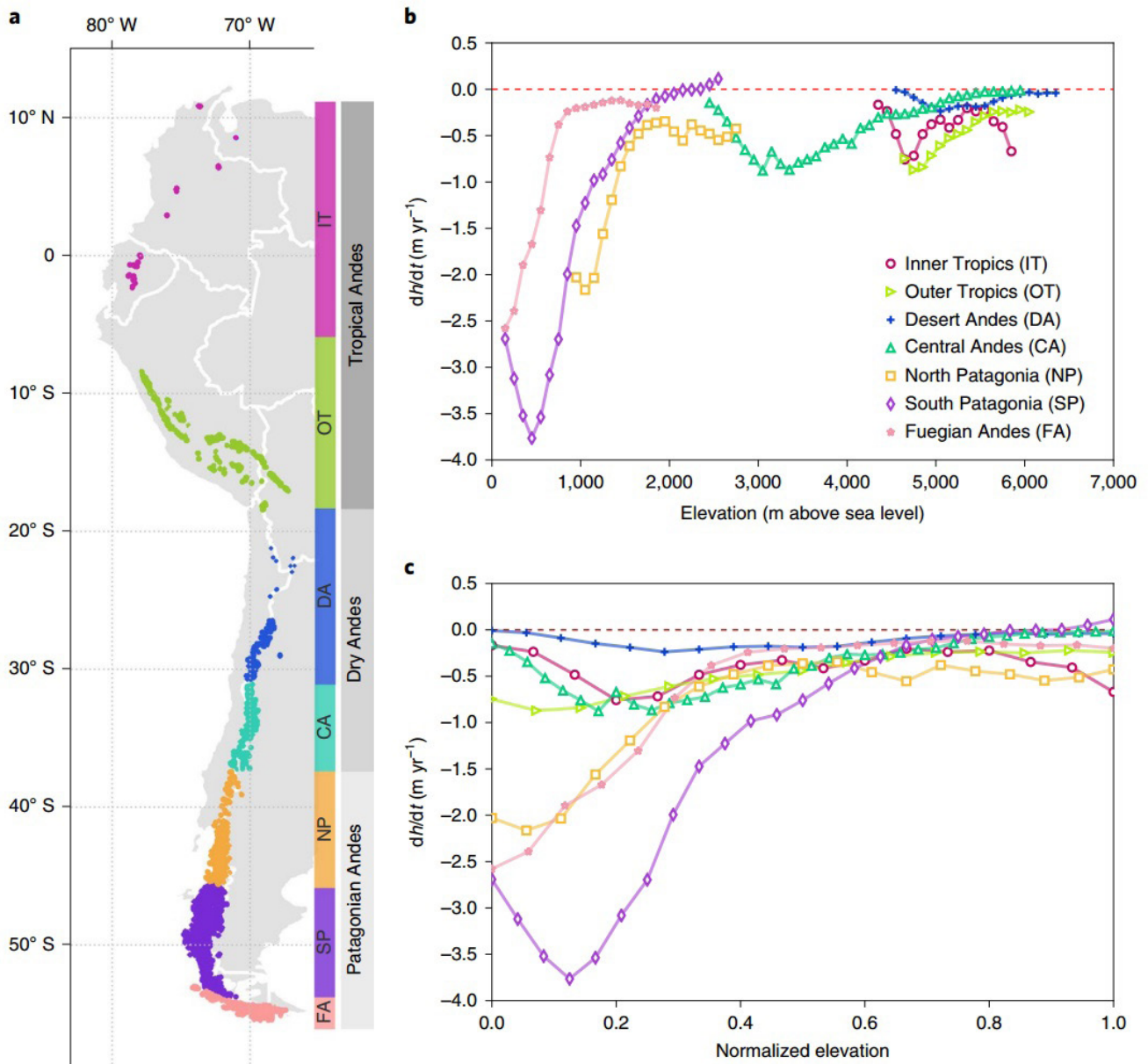


Figura 11. Distribución altitudinal de los cambios en la elevación de glaciares. (a) Sub-regiones según latitud y clima; (b) cambios en la elevación de los glaciares por sub-región durante el período 2000-2018; (c) cambios en la elevación de los glaciares en función a la elevación normalizada (fuente: Dussaillant *et al.*, 2020).

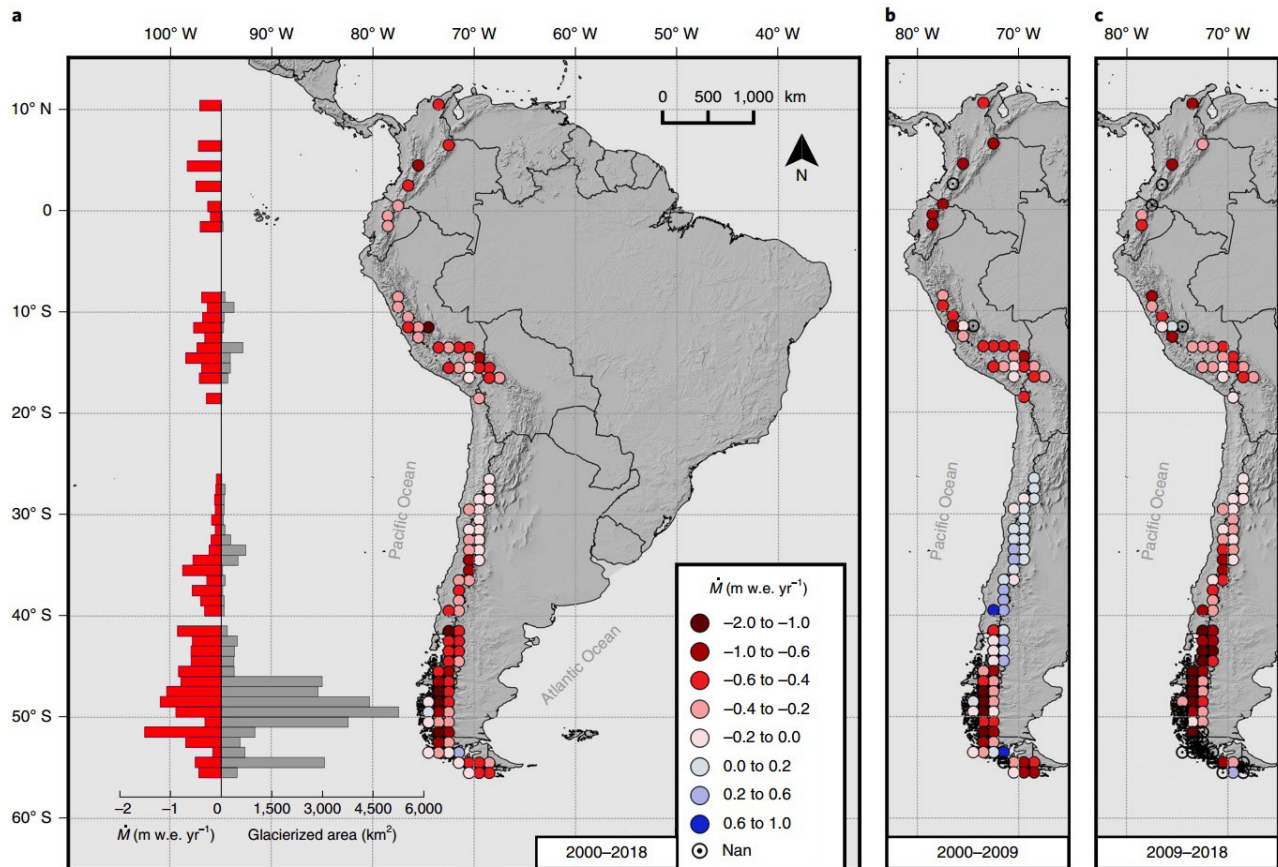


Figura 12. Balance de masa promedio (tamaño de celda igual a 1°). (a) Marzo de 2000 a abril de 2018; (b) enero de 2000 a marzo de 2009; (c) enero de 2009 a abril de 2018. El histograma gris representa el área con cobertura glaciar; el histograma rojo representa la variación de la altura promedio (balance de masa) (fuente: Dussaillant et al., 2020).

3.1. Andes tropicales

En la década de 1970 los glaciares tropicales representaban el 5% de los glaciares de montaña del mundo y cubrían una superficie comparable a la de los glaciares de los Alpes. Los glaciares tropicales se encuentran dispersos en tres continentes (América, África e Indonesia), pero cerca del 99% se concentra en La Cordillera de Los Andes (el 70% en Perú, el 20% en Bolivia y el resto en los Andes de Ecuador, Colombia y Venezuela). A pesar de su reducida importancia en términos de volumen de agua, se cree que estos glaciares juegan un rol importante como indicadores climáticos. En términos de recursos hídricos, los glaciares tropicales tienen un valor económico importante a escala regional, particularmente cuando el régimen pluviométrico incluye una marcada variabilidad estacional (Vuille et al., 2008a).

Situación actual de los glaciares de Los Andes Tropicales

En 2013 Rabatel et al. presentaron una completa revisión de los cambios experimentados por los glaciares en Los Andes Tropicales durante las últimas décadas. La información disponible entre 1940 y 1960 es escasa, pero la evidencia disponible en Perú, Bolivia y Colombia muestra un retroceso moderado, seguido por un período relativamente estable hasta la segunda mitad de la década del 70. A finales de la década del 70 se produjo un punto de inflexión y los volúmenes, longitudes y superficies de los glaciares comenzaron a disminuir sustancialmente.

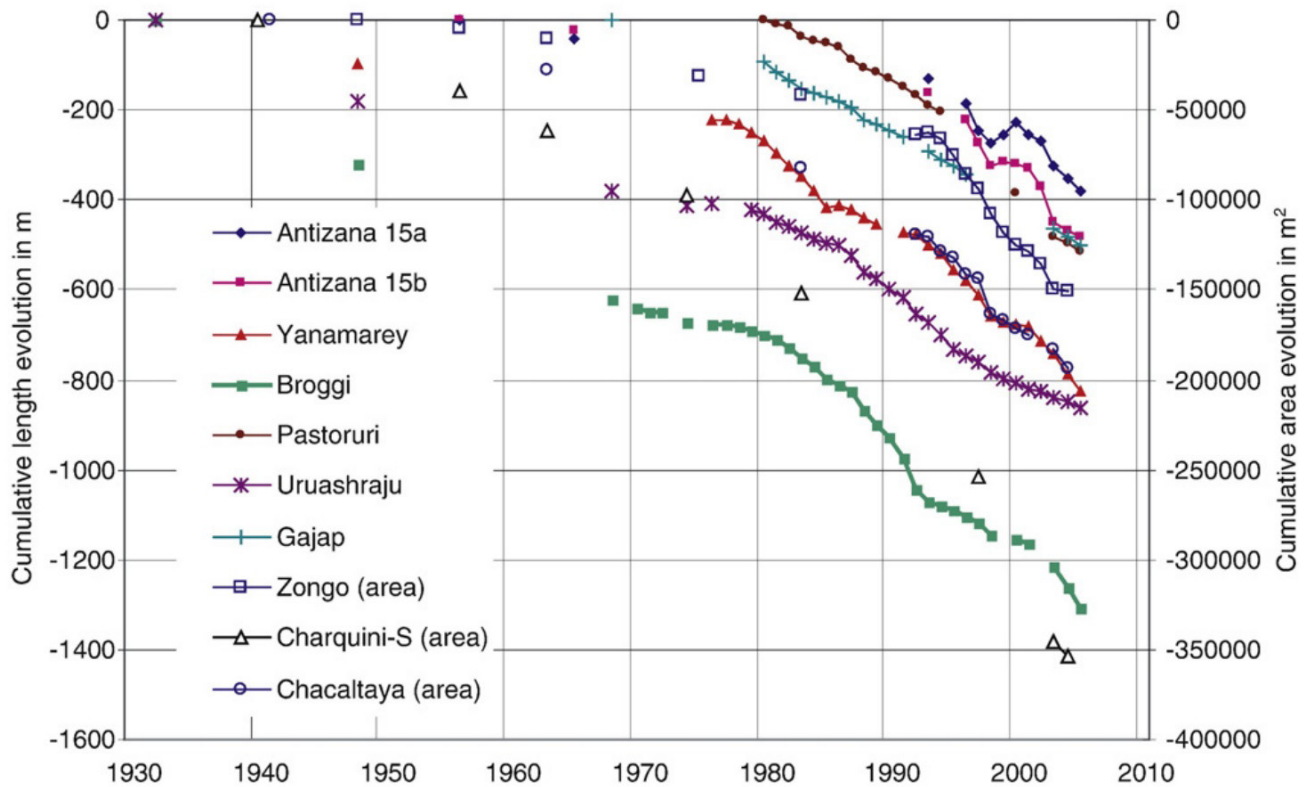


Figura 13. Variaciones de la longitud y del área superficial en diez glaciares de Los Andes Tropicales entre 1930 y 2005 (fuente: Vuille *et al.*, 2008a).

3.2. Andes meridionales o extra-tropicales

En Los Andes Chilenos la superficie total de hielo limpio alcanza los 20.508 km², equivalentes al 85% del área total cubierta por glaciares, aproximadamente. La mayor parte se encuentra en Patagonia y Tierra del Fuego, así como en los glaciares de montaña y glaciares de valle de la Región de Los Lagos y en los Andes Centrales (Barcaza *et al.*, 2017). El 15% restante, que incluye tanto glaciares de roca como glaciares cubiertos de detritos, se encuentran principalmente en Los Andes Desérticos y en Los Andes Centrales.

En Los Andes Argentinos se identificó un total de 16.078 glaciares que cubren un área aproximada de 5.796 km² (Zalazar *et al.*, 2020). La mayor área cubierta de hielo se encuentra al sur de Los Andes Patagónicos, con 3.421 km² (59%), mientras que Los Andes Centrales contienen el mayor número de glaciares (50%). Los glaciares más grandes inventariados en Argentina corresponden a glaciares efluentes del Campos de Hielo Sur, glaciares de montaña y glaciares de valle, representando cerca del 83% del área total. En contraste, los glaciares de roca, emplazados preferentemente en Los Andes Centrales, son la categoría más numerosa (cerca del 48%); sin embargo, son más pequeños (< 2km²) y solo representan el 12% del área total.

Tabla 1. Número y área de glaciares chilenos por sub-zona, región y cuenca. Inventario a partir de imágenes Landsat 2000/03 (fuente: Barcaza et al., 2017).

Zone		Region	Catchment	Number	Area km ²	
Dry Andes	Desert Andes	Norte Grande	Altiplano down to Cerro Sillajhuay (19°45' S)	373	36.2	
			Endorheic basins between Cerro Aucanquilcha (21°28' S) and Vn. Llullaillaco (24°43' S)	93	5.1	
			Puna de Atacama down to Nevado Tres Cruces (27° S)	257	21.0	
Wet Andes	Central Andes Lakes District and Palena Province	Norte Chico	Copiapó - Choapa	1334	126.6	
			Petorca - Maule	2624	869.5	
		Central Andes Lakes District	Itata - Cochamó	447	193.9	
			Puelo - Cisnes	3474	817.6	
		Patagonia and Tierra del Fuego	Northern Patagonia Icefield and surrounding areas	West coast from Vn. Yate to Vn. Mentolat	687	364.5
				Nevado Queulat	37	102.8
	West coast and Aysén			1168	412.2	
	Exploradores other than NPI			294	86.8	
	NPI main (Outlets)			28	3758.9	
	NPI mountain glaciers connected other than Outlets			87	151.6	
	Southern Patagonia Icefield and surrounding areas		West coast North of Fjord Calén (unconnected)	626	175.0	
			Baker other than NPI	3353	1331.4	
			Bravo and others north of Fjord Calén	646	286.7	
			Pascua other than SPI	1144	302.9	
			SPI main (Outlets to Pacific Ocean)	39	8379.1	
			SPI mountain glaciers connected other than Outlets	287	1465.4	
	Mainland north of Strait of Magellan	Mainland north of Strait of Magellan	West coast of SPI (unconnected)	2647	348.8	
			SPI (Combined East side*)	5	215.6	
			Serrano other than SPI	415	133.1	
			Última Esperanza (Mount Balmaceda and others)	400	61.6	
			Cordillera Sarmiento	288	127.7	
			Other mountain glaciers north of Strait of Magellan	737	120.4	
		Archipelagos south of Strait of Magellan down to Cape Horn	Gran Campo Nevado (Outlets and mountain glaciers)	28	190.8	
			Isla Riesco	444	205.8	
Other Archipelagos			221	72.0		
Mountain glaciers of Tierra del Fuego			894	826.1		
Cordillera Darwin (Outlets and mountain glaciers)			172	179.4		
Isla Desolación			6	13.5		
Isla Santa Inés (Outlets and mountain glaciers)	283	267.0				
Isla Hoste (Outlets and mountain glaciers)	467	345.4				
			24.005	23.708		

*A portion of the drainage area of five east side glaciers contributing to the Atlantic Ocean.

Tabla 2. Área, número y elevación media de glaciares por región, Andes Argentinos (*fuentes: Zalazar et al., 2020*).

Región	Ice mass	Area (km ²)	% Area	No.	% No.	Mean Area	Mean elevation
Desert Andes	Glacier	100	2.1	110	4.3	0.92	5393
	Perennial snowfield	81	30.5	1220	20.9	0.07	5579
	Rock glacier	89	13.3	1656	21.6	0.05	4693
	Total	270	4.7	2986	18.6	0.09	5081
Central Andes	Glacier	1150	23.8	985	38.4	1.17	4429
	Perennial snowfield	67	25.2	1582	27.1	0.04	4667
	Rock glacier	550	82.1	5509	71.9	0.1	3989
	Total	1767	30.6	8076	50.2	0.22	4175
Northern Patagonia Andes	Glacier	226	4.7	494	19.3	0.46	1873
	Perennial snowfield	59	22.1	1575	26.9	0.04	1905
	Rock glacier	4	0.7	84	1.1	0.05	2722
	Total	289	5	2153	13.4	0.13	1929
Southern Patagonia Andes	Glacier	3345	69.2	859	33.5	3.88	1653
	Perennial snowfield	55	20.7	1296	22.2	0.04	1652
	Rock glacier	21	3.2	265	3.5	0.08	1699
	Total	3421	59.3	2420	15.1	1.41	1658
Tierra del Fuego Andes	Glacier	12	0.3	116	4.5	0.11	1013
	Perennial snowfield	4	1.4	174	3	0.02	999
	Rock glacier	5	0.8	153	2	0.03	906
	Total	21	0.4	443	2.8	0.05	971
Total Andes		5769	100	16078	100	0.34	3575

Situación actual de los glaciares de Los Andes Meridionales

Las temperaturas en las montañas de Chile y Argentina han aumentado aproximadamente entre 0.2°C y 0.3°C cada decenio desde 1976 (Falvey y Garreaud, 2009), y continúan aumentando (Vuille *et al.*, 2015). Los glaciares de la región, al igual que en Los Andes Tropicales, han ido retrocediendo sobre todo en los últimos decenios. Los grandes glaciares terrestres y marinos de la Patagonia y Tierra del Fuego han experimentado un retroceso rápido (Warren y Sugden, 1993). Algunos de los casos más drásticos son el retroceso del glaciar Jorge Montt (19.5 km entre 1898 y 2011; Rivera *et al.*, 2012a), el glaciar O' Higgins (14.6 km entre 1896 y 1995; Casassa *et al.*, 1997) y el glaciar Upsala (6.7 km entre 1945 y 1995; Aniya, 1995; Skvarca *et al.*, 2003; Sakakibara *et al.*, 2013). El retroceso de los glaciares no se limita a las zonas de baja altitud, donde alcanzan sus valores máximos, sino que también se produce en zonas de mayor elevación (Wills *et al.*, 2012a, b).

Le Quesne *et al.* (2009) documentaron las variaciones históricas de algunos glaciares de los Andes Centrales chilenos y argentinos y las compararon con una reconstrucción basada en anillos de árboles. Todos los glaciares estudiados exhibieron una tendencia negativa durante el siglo XX con retrocesos frontales medios entre -50 y -9 m/año, tasas de adelgazamiento entre 0.76 y 0.56 m/año y una reducción media del área de hielo del 3 % desde 1955.

Tabla 3. Cambios de área en algunos glaciares de Los Andes Centrales (fuente: Le Quesne et al., 2009).

Glacier Name	Country	Period	Frontal areal change km ²	Rate km ² yr ⁻¹
Cipreses	Chile	1982-1852	-0.63	-0.063
		1852-1882	-1.53	-0.051
		1882-1955	-0.78	-0.011
		1955-1968	-0.14	-0.011
		1968-1987	-0.35	-0.019
		1987-1997	-0.01	-0.001
		1997-2000	-0.02	-0.007
		2000-2004	-0.01	-0.004
Total Universidad	Chile	1842-2004	-3.48	-0.022
		1955-1987	-0.74	-0.023
		1987-2000	-0.25	-0.019
Cortaderal Palomo	Chile	1955-2000	-0.99	-0.022
	Chile	1987-2000	-0.25	-0.019
Total de la Laguna	Chile	1955-1968	-0.35	-0.027
		1968-1978	-0.12	-0.012
		1978-1987	0.03	0.003
		1987-2000	-0.01	-0.001
		1955-2000	-0.45	-0.01
Total Humo	Argentina	1914-1948	-1.28	-0.038
		1948-1955	-0.19	-0.027
		1955-1963	-0.33	-0.041
		1963-1970	-0.08	-0.011
		1970-1976	-0.06	-0.009
		1976-1982	0.57	0.095
		1982-1987	-0.13	-0.026
		1987-2000	-0.23	-0.018
		1914-2000	-1.72	-0.02
		1914-1948	-1.15	-0.034
Total	Argentina	1948-1955	-0.09	-0.013
		1955-1963	-0.06	-0.007
		1963-1970	-0.12	-0.017
		1970-1976	-0.06	-0.01
		1976-1982	-0.07	-0.011
		1982-1987	-0.06	-0.012
		1987-2000	-0.09	-0.007
		1914-2000	-1.7	-0.02

Barcaza et al. (2017) estudiaron las variaciones recientes de 98 glaciares distribuidos a lo largo de Chile, cuya superficie conjunta representa el 31% del área total de glaciares de Los Andes Chilenos. Los resultados indican que la disminución del área es más drástica en los 77 glaciares de hielo limpio (sin detritos), con una disminución total de 92.3 ± 4.6 km². Por su parte, la extensión de los 21 glaciares de roca y glaciares cubiertos de detritos - ubicados preferentemente en Los Andes Desérticos y en Los Andes Centrales - varió sólo marginalmente.

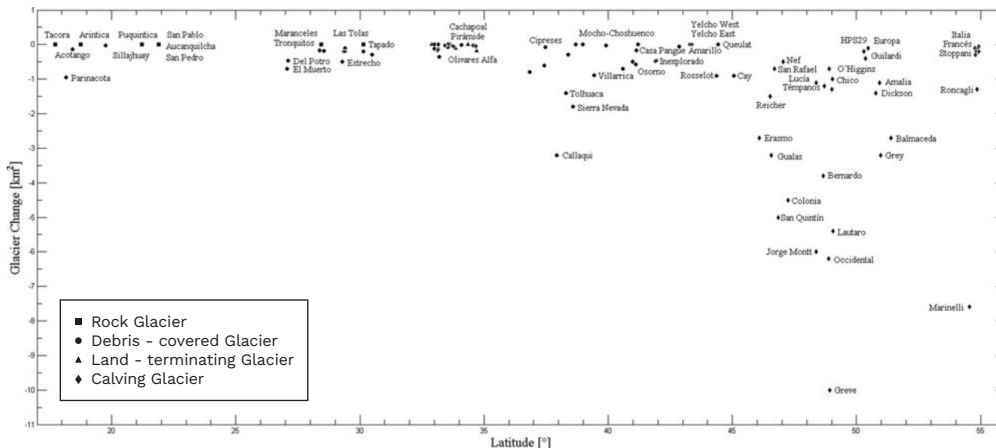


Figura 14. Variaciones de área para 98 glaciares en Los Andes chilenos. Período 2000/03 – 2015 (fuente: Barcaza et al., 2017).

Los mayores retrocesos se reportaron en Los Andes Patagónicos y en Tierra del Fuego. Entre 2001 y 2015, el glaciar Colonia, uno de los cinco glaciares efluentes más grandes del Campo de Hielo Norte, retrocedió 4.5 km², mientras que el glaciar Marinelli, en la Cordillera de Darwin, retrocedió 7.0 km².

En Los Andes Desérticos, el glaciar Tronquitos, uno de los glaciares más grandes de la cuenca del río Copiapó, retrocedió 0.18 km² entre 2003 y 2015. En la cuenca del río Maipo, ubicada en Los Andes Centrales, el mayor retroceso se observó en el glaciar Olivares Alfa (0.36 km²). En la Provincia de Palena, la lengua oeste del complejo Inexplorado retrocedió 0.48 km².

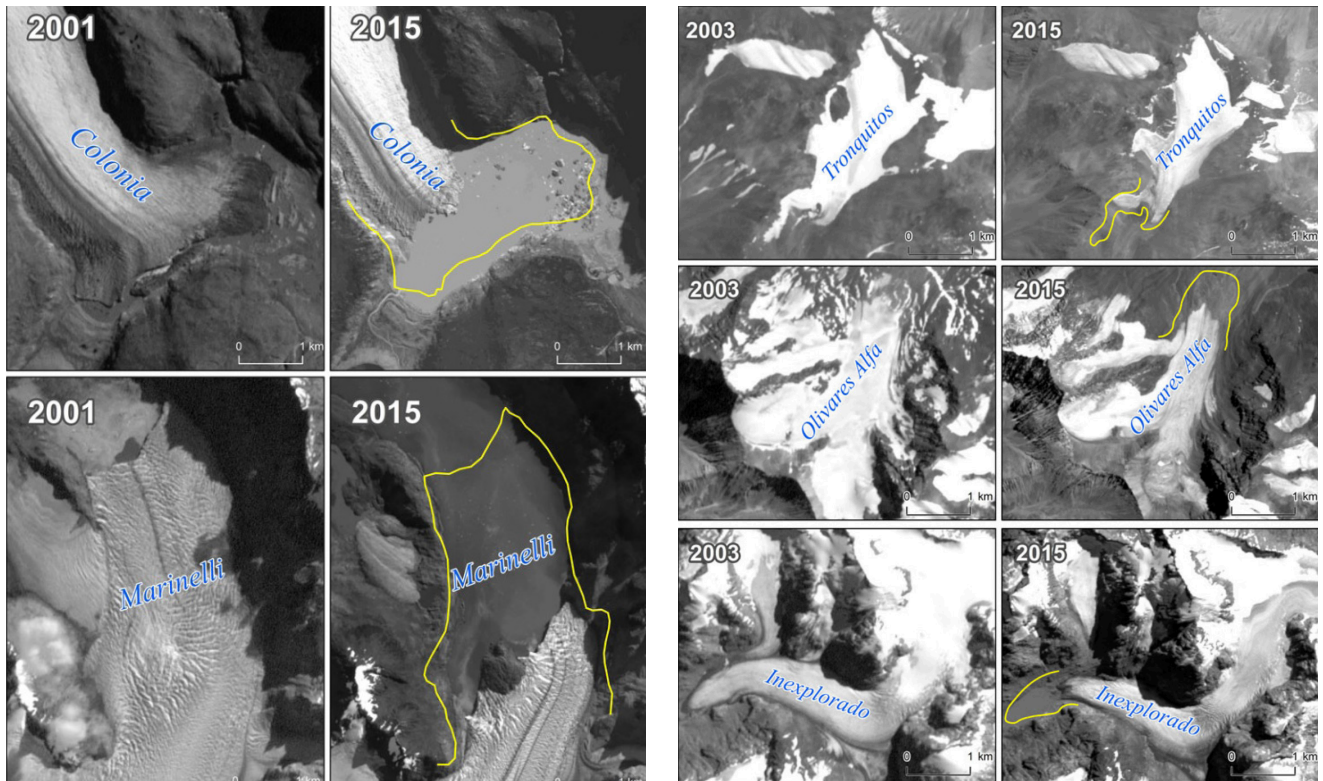


Figura 15. Variaciones frontales en algunos glaciares de Los Andes chilenos (fuente: Barcaza et al., 2017).



INDUSTRIA MINERA Y GLACIARES

1. Impactos de la industria minera en los ecosistemas glaciares
2. Experiencia internacional
3. Impactos reportados en glaciares chilenos



GLACIARES DE LA CORDILLERA DE LOS ANDES.
IMPACTOS DE LA INDUSTRIA MINERA

// 2023

Desde hace algunos años ha tenido visibilidad internacional la situación de comunidades gravemente afectadas en sus derechos humanos por el avance de proyectos extractivos a gran escala y de infraestructura en sus territorios. Estos proyectos, realizados generalmente sin participación, consulta previa e, incluso, con oposición de las comunidades afectadas, han generado serios cuestionamientos (Grupo de Trabajo sobre Minería y Derechos Humanos en América Latina, 2014).

En América Latina son numerosos los conflictos por la resistencia de las comunidades a modelos de minería que afectan el medio ambiente y vulneran los derechos humanos. La base de datos del Observatorio de Conflictos Mineros en América Latina (OCMAL) registraba, a la fecha de elaboración del informe (2014), cerca de 198 conflictos activos por causa de la mega minería en la región. De esos conflictos, 26 se presentaban en Argentina, 20 en Brasil, 34 en Chile, 12 en Colombia, 29 en México y 34 en Perú.

4.1. Impactos de la industria minera en los ecosistemas glaciares

4.1.1. Disminución del albedo y aumento de la ablación por depositación de material particulado

La nieve, un tipo de cobertura que abarca grandes extensiones de la superficie terrestre y se concentra en latitudes extremas y/o en ambientes de alta montaña, ejerce una importante influencia sobre el balance de energía global, principalmente a través de su alto albedo. Los registros satelitales y de observaciones de campo de largo plazo muestran que tanto la masa como la extensión de la cobertura de nieve han disminuido, hecho atribuido principalmente al calentamiento global. Sin embargo, la duración de la cobertura de nieve se ve afectada aún más debido al oscurecimiento de su superficie por la depositación de partículas que absorben luz (LAP, por sus siglas en inglés), típicamente aerosoles oscuros, que han sido reconocidos como un importante contribuyente al cambio climático antropogénico ya desde la década de los 70 (Skiles *et al.*, 2018).

Las LAP aceleran el derretimiento de la cobertura de nieve o de hielo a través de perturbaciones de su albedo y del forzamiento radiativo asociado, es decir, aumentando la absorción de radiación incidente debido al oscurecimiento de la superficie. Cuando estas LAP se encuentran sobre la superficie de la nieve o cerca de ella reducen inmediatamente el albedo en las longitudes de onda visibles en las que la nieve es más reflectante. La disminución del albedo se ve potenciada por un proceso conocido como retroalimentación granulométrica, que describe cómo el calentamiento asociado a las LAP acelera el crecimiento de los granos de nieve reduciendo aún más la reflectividad de la superficie (Doherty *et al.*, 2013). En conjunto, el forzamiento radiativo directo (oscurecimiento) e indirecto (engrosamiento del grano) deja al descubierto superficies oscurecidas previamente, incrementando la energía disponible para la fusión de nieve o hielo.

Forzamiento radiativo por polvo

El polvo, proveniente principalmente desde zonas áridas y semi-áridas, es el aerosol atmosférico más común en cuanto a masa. Pese a que su formación tiene un origen natural, estudios recientes han mostrado que la cantidad de polvo en la atmósfera se ha duplicado en el siglo XX (Mahowald *et al.*, 2010), debido, probablemente, a la sequía inducida por el cambio climático, al manejo antropogénico del suelo y al aumento de la actividad minera en zonas de montaña.

Dado que los procesos de emisión de polvo presentan una gran variabilidad y sus propiedades ópticas varían según la región de origen (Skiles *et al.*, 2018), el polvo en la nieve ha recibido poca atención en términos de impactos climáticos. Sin embargo, algunas investigaciones recientes han demostrado que el polvo puede dominar el forzamiento radiativo de las LAP en la nieve cuando está presente en concentraciones suficientemente altas (Sterle *et al.*, 2013; Skiles y Painter, 2018).

El polvo es una de las principales LAP emitidas por la industria minera, particularmente la minería de rajo abierto. La depositación de polvo sobre un glaciar blanco (sin cubierta de detritos) reduce el albedo de su superficie, lo que se traduce en un aumento de la temperatura superficial y, consecuentemente, en un aumento de las tasas de ablación. La tasa de derretimiento, sin embargo, depende en gran medida del espesor de la capa de polvo. Cuando

alcanza un espesor crítico, la capa de polvo comienza a aislar térmicamente el hielo subyacente y la ablación disminuye (e.g., Mattson *et al.*, 1993). Los cambios en el espesor de la capa de polvo también producen cambios en las tasas de sublimación, principalmente debido a la reducción de la sublimación forzada por el viento. El espesor crítico de la capa de polvo varía entre 15 y 50 mm, y el aumento de la ablación inducida por la deposición de polvo puede ser de hasta 250% (Arenson *et al.*, 2015).

El polvo emitido por la industria minera tiene su origen en las propias actividades extractivas, como tronaduras, procesos de carga, transporte y descarga de material, procesos metalúrgicos, etc. Además, la remoción eólica de material fino desde botaderos activos o abandonados puede aportar significativamente a las emisiones totales de polvo.

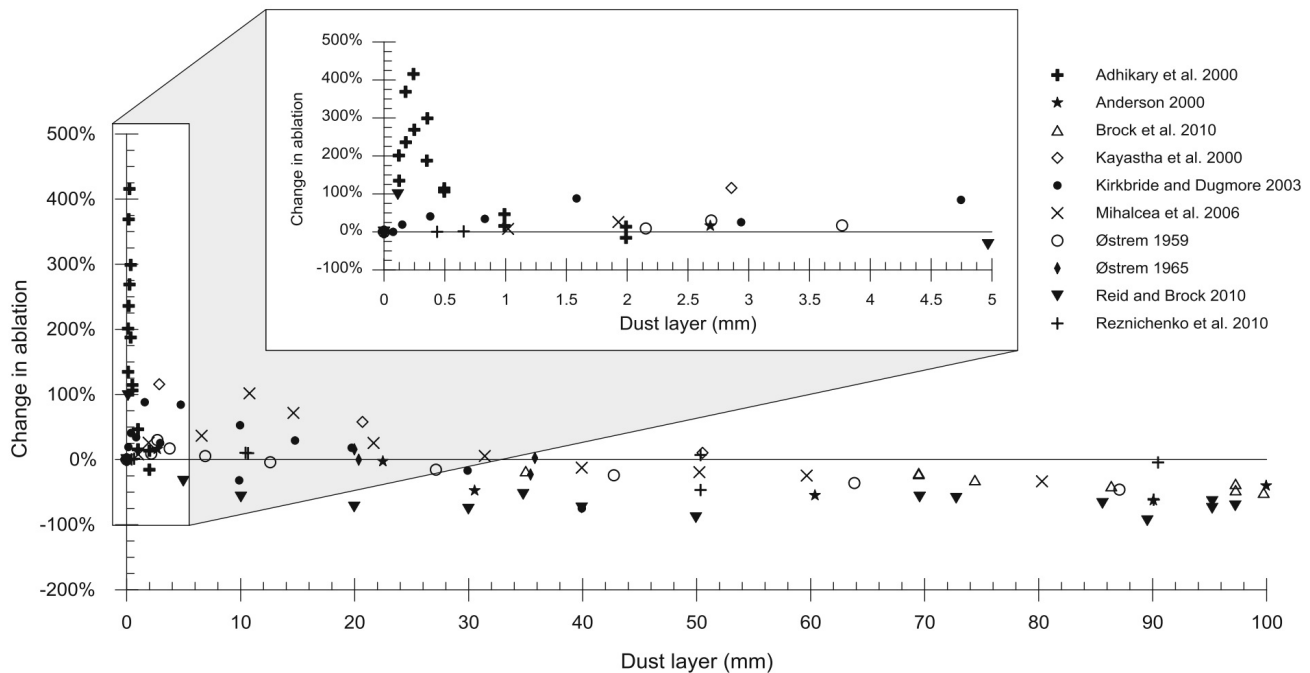


Figura 16. Recopilación de registros de ablación del hielo como una función del espesor de la capa de polvo (fuente: Arenson *et al.*, 2014).

Forzamiento radiativo por Black Carbon (BC)

El carbono negro (BC, por sus siglas en inglés) es un aerosol que contiene partículas sólidas en suspensión y forma parte del material particulado fino (diámetro inferior a 2.5 micrómetros). El BC tiene una estructura similar al grafito y consiste en agregados o cadenas de esférulas pequeñas (entre 10 y 50 nm, aproximadamente); se transforma en gas a temperaturas muy altas (>4000 °C); es insoluble en agua y otros solventes; y absorbe eficazmente la radiación solar en el espectro visible (Bond *et al.*, 2013).

El BC forma parte de los llamados contaminantes climáticos de vida corta, los cuales tienen un importante potencial de calentamiento global y un tiempo de vida en la atmósfera más corto que el dióxido de carbono. El BC proviene de la combustión incompleta de combustibles que tienen carbono en su estructura química, como el carbón, el petróleo, el gas y la leña (entre otras biomásas).

La deposición de BC también puede alterar directamente el albedo de la nieve o el hielo y el forzamiento radiativo asociado, lo que oscurece la superficie y acelera el derretimiento (Hansen y Nazarenko, 2004; Skiles *et al.*, 2018). A medida que la nieve y el hielo se derriten o subliman, el BC permanece y se acumula en la superficie de la nieve (Schmitt *et al.*, 2019). Se ha demostrado que los efectos climáticos del BC dependen de si se mezcla con nieve fresca, nieve antigua o hielo granular. Por ejemplo, los efectos climáticos del BC en la parte inferior sucia de un glaciar son mayores que cuando el BC se mezcla con nieve fresca (Kaspari *et al.*, 2014; Schmale *et al.*, 2017).

Además del polvo, la industria minera emite aerosoles tóxicos y gases durante la explotación y, sobre todo, durante procesos de hidrometalurgia que implican el riego por aspersión de pilas de mineral con compuestos a menudo de alta toxicidad. Los gases emitidos tienen su origen en la combustión de la maquinaria, la emisión natural durante el proceso de extracción, la emisión durante tronaduras, y la emisión en procesos directamente relacionados con la actividad minera: combustión de carbón (COx, NOx, SOx) y pirometalurgia (SO2).



Figura 17. Ejemplo emisión de polvo y BC en la industria Minera. Chuquicamata.

4.1.2. Impactos reportados sobre glaciares de roca

Las intervenciones mineras en glaciares rocosos de Chile son hechos únicos a nivel mundial y fueron estudiados por primera vez por Brenning y Azocar (2008). En términos generales, los tipos de intervenciones incluyen: la construcción de caminos sobre glaciares rocosos, la creación de depósitos de lastre (roca estéril de bajo contenido de mineral), y la remoción completa o parcial de glaciares rocosos.

Estas intervenciones, sobre todo la depositación de material estéril, tienen varias consecuencias ambientales en el corto y largo plazo que pueden incluir:

- el aceleramiento, la inestabilidad y el posible colapso de glaciares rocosos con depósito de lastre (escala de tiempo: meses a años);
- la contaminación de agua almacenada en glaciares rocosos como consecuencia de la percolación de soluciones ácidas (ARD, por sus siglas en inglés) provenientes de depósitos de lastre sobre glaciares rocosos (escala de tiempo: años a décadas);
- la degradación del permafrost (capa de suelo congelado permanente) y posible inestabilidad como consecuencia de la producción de calor asociada al ARD (escala de tiempo: años a décadas);
- la degradación del permafrost de glaciares rocosos como consecuencia de una alteración de propiedades físicas superficiales como del albedo o conductividad térmica, p.ej. por compactación del material (escala de tiempo: años a décadas);
- la degradación basal del permafrost de glaciares rocosos con depósitos de lastre por efecto del gradiente geotérmico (escala de tiempo: décadas a siglos).

4.1.3. Otros impactos



Remoción parcial o completa de un glaciar descubierto

El caso más evidente de afectación de glaciares se relaciona con la remoción total o parcial de hielo durante las etapas de construcción y operación de faenas mineras. La destrucción de cerca del 70% de los glaciares Toro 1 y Toro 2 por parte de la minera Los Pelambres es un caso emblemático de este tipo de intervenciones en Chile. Un caso excepcional se ha reportado en Kirguistán, donde la minera Kumtor remueve hielo glaciar sistemáticamente como parte de la operación continua de la mina, ya que los glaciares presentes en las faenas fluyen hacia el interior del rajo.



Inestabilidad estructural por vibraciones asociadas a las tronaduras

Las vibraciones asociadas a tronaduras, principalmente, y al tránsito de camiones y maquinaria, en menor medida, pueden afectar la dinámica de los glaciares emplazados en las inmediaciones. Esta afectación depende del tipo de roca, que condiciona la velocidad y la magnitud de las ondas expansivas, y de la estabilidad estructural del glaciar afectado. La estabilidad estructural de un glaciar, a su vez, depende de diversos factores, como el contenido de agua líquida en la interfaz roca basal/hielo o las condiciones del frente terminal del glaciar (si éste descansa sobre roca o en un cuerpo de agua).

Las vibraciones por tronaduras pueden producir el colapso del frente terminal de un glaciar o afectar su dinámica, modificando los patrones de flujo y deslizamiento.



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

Es común observar la formación de una red de agua líquida tanto en la superficie como en la base y al interior de un glaciar, siendo ésta más evidente durante el período de estiaje, cuando los procesos de ablación o derretimiento de nieve/hielo son predominantes. El contenido de agua líquida en la base de un glaciar condiciona su dinámica, determinando su velocidad de deslizamiento. La extracción de agua subterránea o subsuperficial en las vecindades de un glaciar puede acelerar el drenaje desde la interfaz roca/hielo, modificando su dinámica en el corto plazo. Lamentablemente, se trata de un proceso complejo desde el punto de vista técnico, por lo que la investigación al respecto es escasa.

4.2. Experiencia internacional

Existen muchas operaciones mineras en distintos lugares del mundo que operan en áreas con glaciares, las que sin duda implican desafíos distintos a la minería en zonas lluviosas, áridas, de montaña, tropicales, etc. Algunos de los desafíos técnicos y ambientales de la minería en áreas con glaciares son:

- desafíos de la excavación y la gestión del flujo de deshielo;
- los caminos de acceso de vehículos y maquinarias deben usar ingeniería adaptativa para contrarrestar el movimiento del hielo;
- la gran escorrentía del agua de deshielo glaciar, concentrada durante el período de estiaje, puede ser difícil de canalizar a través de superficies glaciares altamente transitorias para minimizar el flujo de entrada;
- control del polvo;
- la hidrología subglacial puede interactuar con la filtración de agua subterránea en operaciones mineras subterráneas.

Tabla 4. Proyectos mineros con desafíos en la gestión de glaciares (fuente: Colgan y Arenson, 2013).

Mine/prospect	Country	Mineral	Apparent status	Glacier-management challenge
Malmbjerg	Greenland	Molybdenum	Under review	Potential glacier traverse ^a
Isua	Greenland	Iron	Under review	Potential subglacial deposit ^b
Black Angel/ Maarmorilik	Greenland	Lead/zinc	Under review	Potential subglacial deposit ^c
Kerr-Sulphurets- Mitchell	Canada	Gold/copper	Under review	Potential subglacial deposit ^d
Svea Nord	Norway	Coal	Active since 2001	Subglacial mining ^e
Kumtor	Kyrgyzstan	Gold	Active since 1997	Open ice pit ^f
Granduc	Canada	Copper	Active 1971 to 1984	Intentional thermokarst ^g
TUTO	Greenland	Ice	Active 1955 to 1959	Ice tunneling ^h

Kumtor

Un caso emblemático por el volumen de hielo afectado es la mina de oro Kumtor, ubicada en las montañas Tien Shan, en Kirguistán

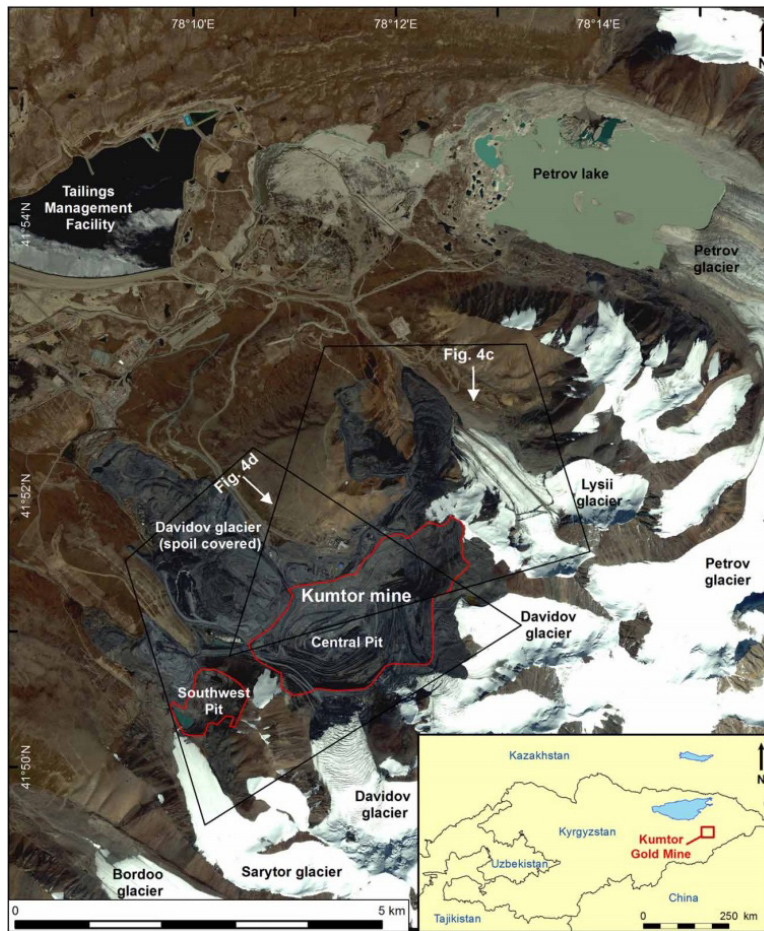


Figura 18. Ubicación faenas mina de oro Kumtor, Kirguistán (fuente: Evans et al., 2015).

En 1992, el gobierno de Kirguistán firmó un acuerdo con Cameco, una empresa minera de uranio, creando Kumtor Gold Company. Las discusiones posteriores llevaron a muchos cambios en el estudio de viabilidad presentado originalmente por Cameco (Sarygulov, 2000). Sin embargo, gracias al apoyo político, el proceso de planificación se simplificó y se presentó un Estudio de Impacto Ambiental que no hacía alusión a ningún impacto ambiental significativo. Desde entonces, hasta finales de 2009, la mina había producido 7.2 millones de onzas de oro (Centerra, 2010). La exploración constante y el aumento de los precios del oro habían contribuido a aumentar significativamente sus reservas.



Figura 19. Mina de oro Kumtor, Kirguistán (fuente: Evans et al., 2015).

La mina está situada en las montañas Tien Shan, al este de Kirguistán (41 52'N, 78 12'E). Se encuentra en la zona de glaciares activos y permafrost que alcanzan entre 100 y 250 m de profundidad (Torgoev y Aleshin, 2001; Bruce et al., 2008).

Durante la operación de Kumtor se removieron todos los glaciares que se ubicaban dentro de los límites de los rajos proyectados. De hecho, fue necesaria una remoción de hielo más allá del contorno del rajo, permitiendo así proteger a las faenas del flujo glaciar. Cuando comenzó su construcción, el máximo espesor glaciar sobre la mina proyectada era de 40 m. A finales de 2007, además de 59.5 millones de toneladas de mineral y 639 millones de toneladas de roca estéril, también se extrajeron 5.9 millones de m³ de hielo glaciar (Bruce et al., 2008). Recientemente, cuando se amplió el contorno del rajo y se observó una aceleración en el flujo del glaciar, aumentó la necesidad de eliminar el hielo, excediendo significativamente el volumen de hielo removido hasta el momento. En 2010 se extrajeron alrededor de 11 millones de m³ y en 2011 alrededor de 22 millones de m³ de hielo glaciar únicamente del rajo central (KOC, 2011, 2012).

Desde el comienzo de la construcción de la mina los glaciares circundantes fueron empleados como botaderos o depósitos de estéril. La proximidad de los vertederos de roca estéril ayudó a mantener bajos los costos de operación de la mina hasta 2005. Esta “ingeniería” glaciar ha sido eficaz en la protección de la mina por lo que se ha mantenido como práctica.

4.3. Impactos reportados en glaciares chilenos

En la actualidad los principales proyectos mineros se concentran en la cabecera de las cuencas de la Región de Valparaíso y Región Metropolitana. A pesar de la llegada de nuevos proyectos, la zona central ya conoce de los impactos de la minería en ambientes glaciares y periglaciares, los que han provocado reducciones en la carga glaciar y en la seguridad hídrica de las poblaciones. Brenning (2005), Brenning y Azocar (2010) y Bellisario et al. (2013) han dado cuenta de intervenciones inéditas en la criósfera de la zona central de Chile. La remoción total o parcial de glaciares, la creación de depósitos de lastres sobre la cubierta glaciar o la construcción de caminos sobre formas periglaciares, son los modos más recurrentes de intervención minera en alta montaña.

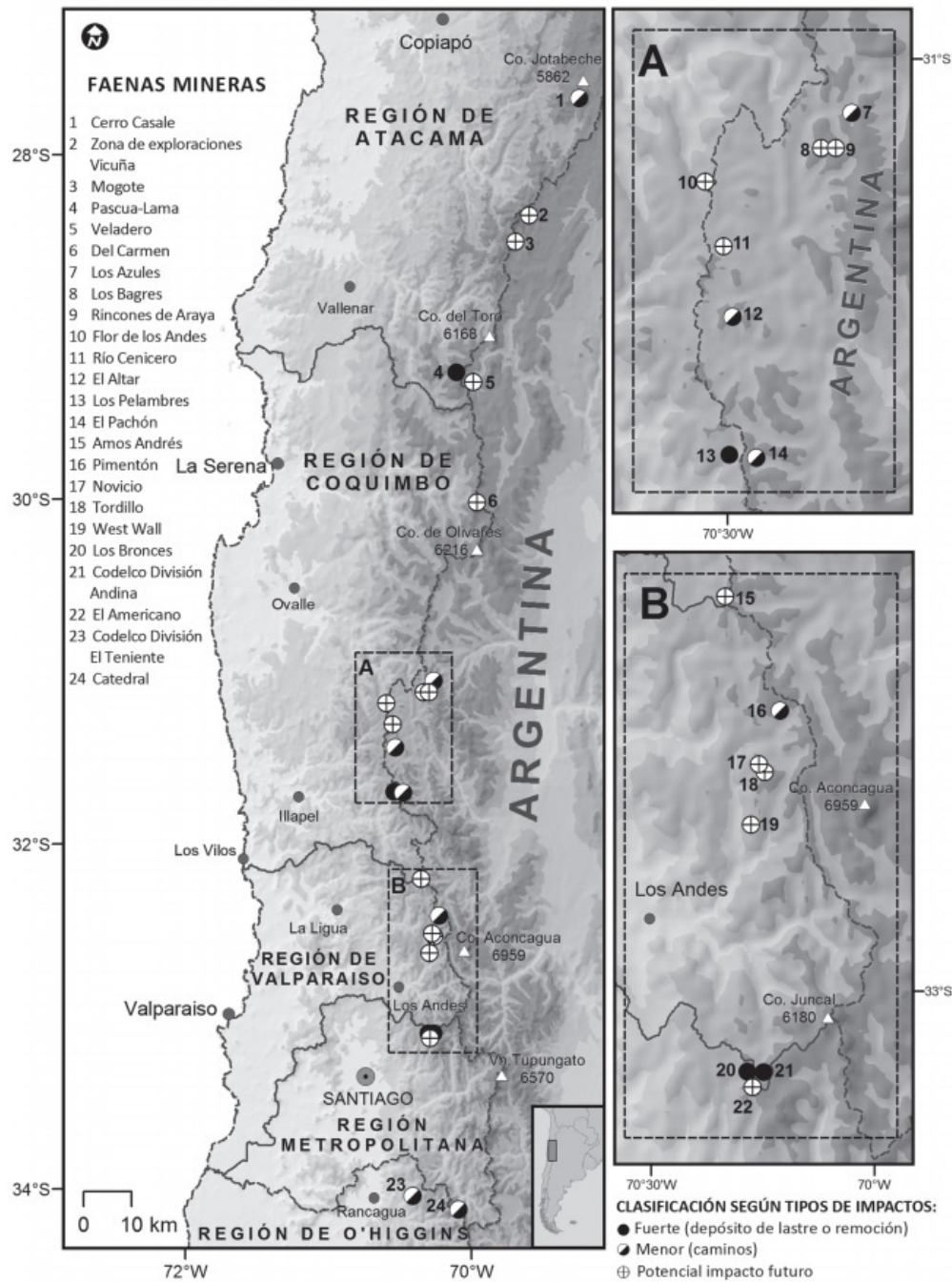


Figura 20. Faenas mineras en zonas altoandinas de Chile y Argentina (fuente: Brenning y Azocar, 2010).

Barrick Gold - Pascua Lama

Pascua-Lama (29° 11' S, 70° 3' W), el primer proyecto minero binacional (chilenoargentino) perteneciente a la empresa canadiense Barrick Gold Corporation, se ubica en la cabecera de la cuenca del río Huasco (parte chilena). Las reservas aprobadas de este proyecto de minería a rajo abierto son de 17 millones de onzas de oro y 635 millones de onzas de plata, y se estima una vida útil de 20 años con una producción anual de al menos 750 mil onzas de oro y 30 millones de onzas de plata (Editec, 2006).

Pascua-Lama inició su proceso de aprobación ambiental el año 2001, aprobándose en una primera instancia la remoción de los campos de nieve perenne Toro 1 (área actual 0.07 km²), Toro 2 (0.07 km²) y Esperanza, (0.01 km²) (Nicholson y Marín, 2008). Estos muchos veces fueron interpretados en el discurso público como glaciares, pero se consideran aquí como campos de nieve por ser de tamaño menor a 0.1 km² (Haeberli, 2000). El proyecto se postergó por razones económicas y políticas hasta el año 2004, año en que se presenta un nuevo Estudio de Impacto Ambiental que enfrentó la fuerte oposición de grupos ambientalistas, agricultores y gobierno (Kronenberg, 2009). El proyecto finalmente fue aprobado en el 2006, prohibiéndose la remoción y alteración de los campos de nieve anteriormente mencionados.

Las exploraciones para Pascua Lama entre los años 1981 y 2000 destruyeron en forma irreversible el 62% del Glaciar Toro 1 y el 71 % del Glaciar Toro 2 en la cuenca alta del río Huasco (Golder Associates, 2003).



Figura 21. Glaciares Toro 1 y Toro 2 (Golder Associates, 2003).

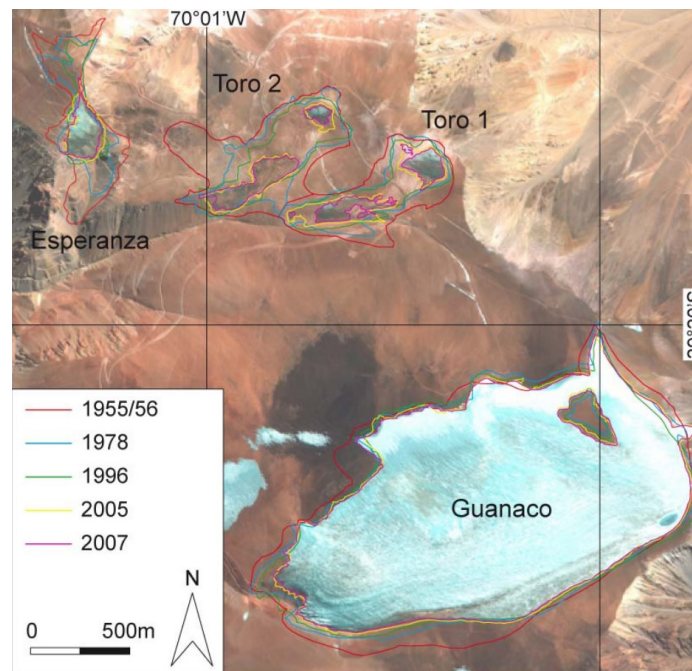


Figura 22. Variación del área de glaciares cercanos a las faenas de la minera Pascua Lama (Rabatel et al., 2011).

Antofagasta Minerals – Los Pelambres

Minera Los Pelambres (31° 43' S, 70° 29' W), propiedad de Antofagasta Minerals (60%) y un consorcio japonés, se ubica en la cabecera de la cuenca del río Choapa. La producción del año 2005 fue de 332 kt de cobre (MinerGía, 2006b). La mina comenzó sus operaciones en el año 1992 con una producción de alrededor de 20 kt de cobre al año. En el año 1997 se presentó un proyecto de expansión al sistema de evaluación ambiental, calificado favorablemente, realizando el cambio de minería subterránea a extracción a rajo abierto. En los años 2002 y 2004 se iniciaron nuevas etapas de ampliación con el fin de mantener constante la producción de cobre fino a pesar de la caída de las leyes del yacimiento (Editec, 2006).

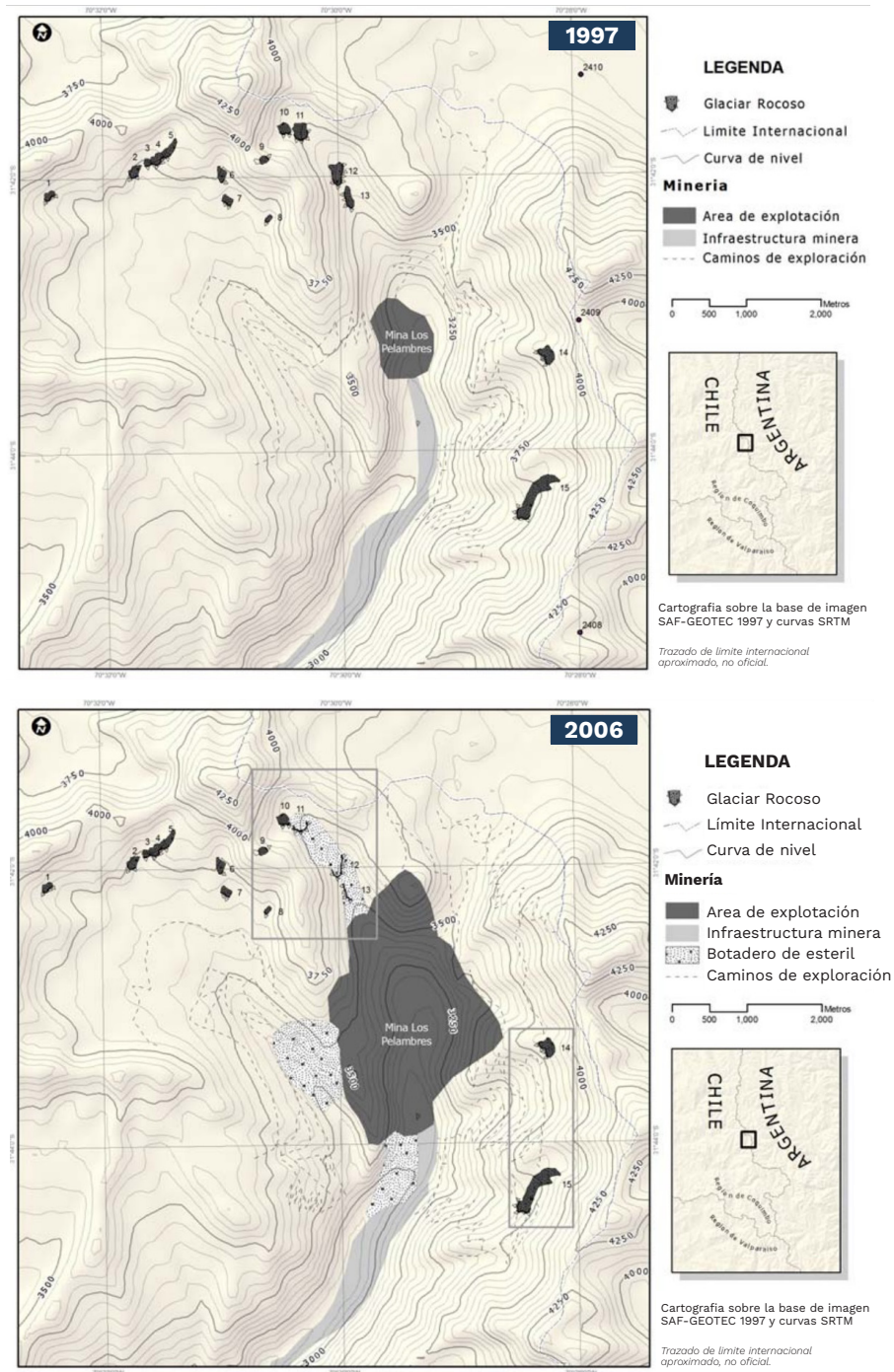


Figura 23. Glaciares rocosos afectados por Minera Los Pelambres entre los años 1997 y 2006 (Azocar y Brenning, 2008).

Azócar y Brenning (2008) examinaron las intervenciones de Los Pelambres en glaciares rocosos sobre la base de fotografías aéreas e imágenes satelitales tomadas entre 1997 y 2006, identificándose 15 glaciares rocosos en los alrededores de la mina, además de la intervención por faenas mineras de varios glaciares rocosos ubicados al noreste y este del rajo de la mina. Cuatro glaciares rocosos localizados en la parte noroeste han desaparecido casi completamente por la depositación de lastre sobre estos (el área de glaciares rocosos afectados es de 0.11 km²). Por otro lado, al este del rajo han sido intervenidos dos glaciares rocosos por la construcción de caminos, equivalentes a 0.14 km² (Azócar y Brenning, 2008). Las intervenciones sobre glaciares rocosos se realizaron durante los años 2004-2005, en forma paralela al avance de los depósitos de estériles en el área (Azócar y Brenning, 2008). Estas actividades de remoción y depositación no fueron anunciadas en los estudios ambientales presentados a la autoridad entre los años 1997 y 2004. Sin embargo, se conocía de su existencia desde el año 1998 (Geoestudios, 1998). Minera Los Pelambres niega la existencia de glaciares rocosos en el área (La Nación, 2008), aunque el análisis de fotografías aéreas de la zona no deja lugar a dudas.

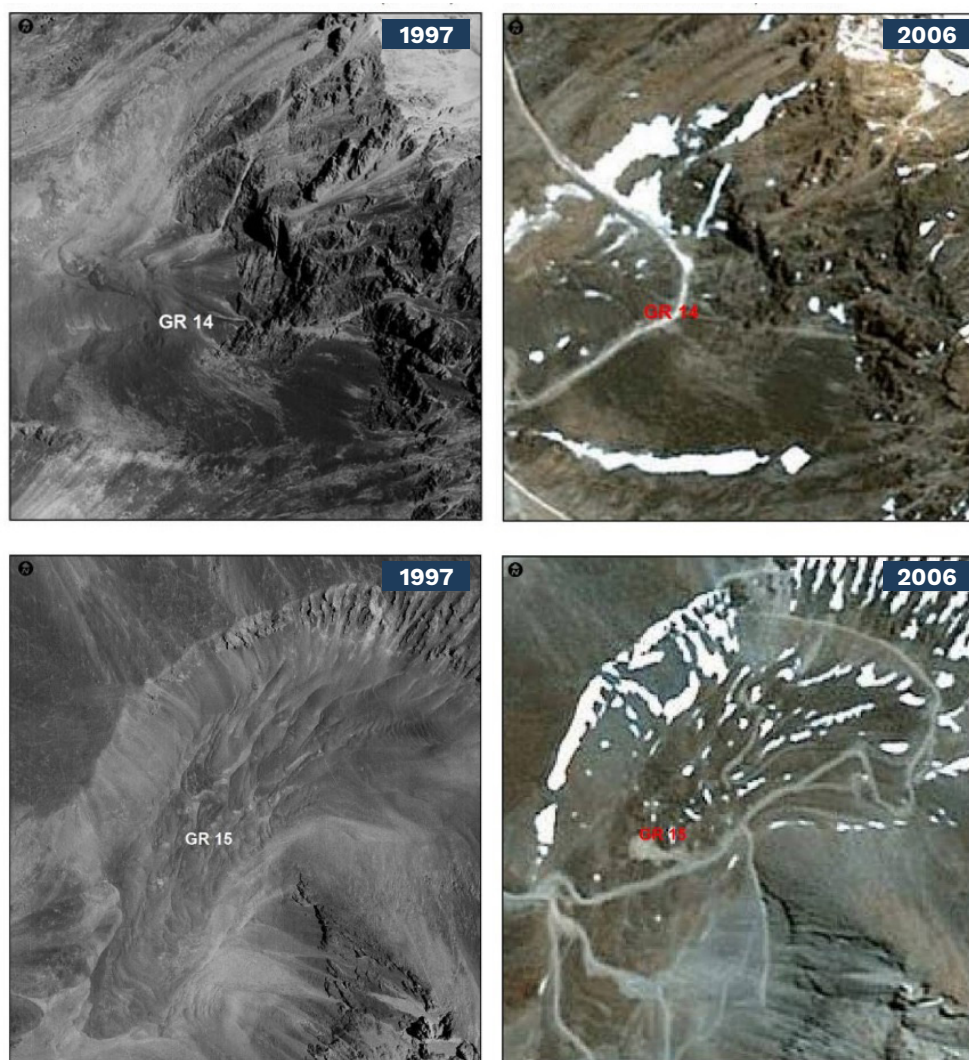


Figura 24. Ejemplos de intervención de glaciares de roca por minera Los Pelambres (fuente: Azocar y Brenning)

Codelco Chile – División Andina

Codelco División Andina (33° 9' S, 70° 15' W), vecina a Los Bronces, es el complejo minero que ha causado las mayores intervenciones en glaciares rocosos a nivel mundial y que, potencialmente, afectará más glaciares en el futuro. Comenzó su operación a gran escala en los años 1980 a través de explotaciones a rajo abierto y subterráneas, y hasta el año 2007 aumentó su producción de cobre a 218 kt (Codelco, 2008).

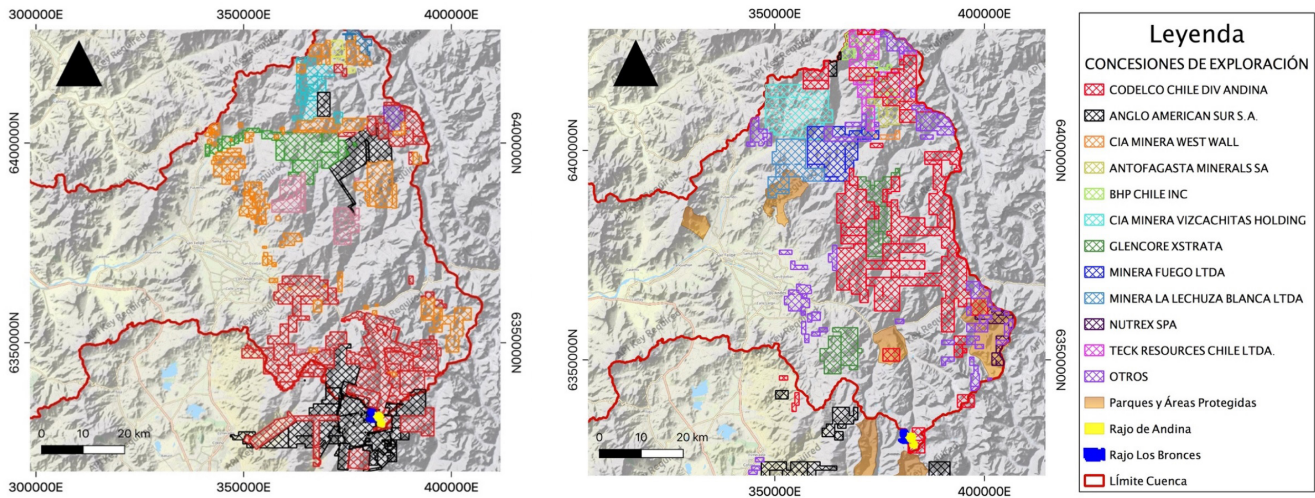


Figura 25. Catastro concesiones mineras de explotación (izquierda) y exploración (derecha). Provincia de Los Andes (fuente: modificado de Arellano, 2021).

Las operaciones de Codelco han impactado glaciares rocosos desde 1980 en la cuenca alta del Río Aconcagua en la Región de Valparaíso, haciendo desaparecer casi completamente dos glaciares rocosos, con un área total de 1.32 km² (identificados por Lliboutry en 1961).

Codelco también ha intervenido 0.78 km² de glaciares rocosos con la construcción de depósitos de lastre e infraestructura minera (Brenning, 2008). Los glaciares más afectados son el Rinconada y el Río Blanco, cuyas lenguas se encuentran en el rajo de la mina.



Figura 26. División Andina Codelco, cuenca del río Aconcagua (fuente: Codelco Andina).

Los estudios del área muestran que entre los años 1991 y 2000 Codelco removió entre 1 y 8 millones de toneladas de hielo al año (Morales, 2001) y estimaron que la empresa continuaría destruyendo glaciares en niveles semejantes los próximos años.

Brenning (2008) ha estimado que entre 1990 y 2008 la División Andina de Codelco removió aproximadamente 2.1 km² de glaciares rocosos en la cabecera del río Aconcagua, lo que es equivalente a volúmenes de 15 a 25 millones de m³ de agua dulce.

Anglo American – Los Bronces

Los Bronces (33° 9' S, 70° 16' W) está situado a los 3500 m s.n.m. en la cuenca del río Mapocho y a 50 km aproximadamente de la ciudad de Santiago. Descubierta en el año 1862, la explotación del mineral se inició en 1906. Durante el siglo XX tuvo propietarios tanto del sector público (ENAMI) como del privado (Exxon Minerals), y finalmente fue adquirida el año 2002 por Anglo American Chile. La producción anual es de 232 kt de cobre (Editec, 2006).

Entre 1988 y 2005 Anglo American destruyó casi un kilómetro cuadrado de glaciares en las cuencas altas del río San Francisco y Olivares (afluentes de los ríos Mapocho y Maipo), provocando una pérdida de entre 6 y 9 millones de metros cúbicos de reserva de agua dulce que estaban almacenadas en los glaciares (Brenning, 2010).



Figura 27. Área de explotación Mina Los Bronces y depósito de lastre sobre glaciar Infiernillo (fuente: Greenpeace).

El impacto de Anglo sobre glaciares rocosos ha sido ampliamente documentado, especialmente el depósito de lastre sobre el glaciar Infiernillo (Contreras y Miañes, 1992; Valenzuela, 2004; Brenning, 2008), que ha acelerado el avance natural del glaciar. Su desplazamiento normal era de entre 0.3 y 1.2 cm año; actualmente, se desplaza unos 20 cm por día a causa de los 14 millones de toneladas de escombros depositadas por la minera en su superficie (Brenning, 2010). Recientemente, Cereceda et al. (2022) reportaron que la depositación de material particulado de origen minero sobre el glaciar Olivares Alpha podría ser responsable del 82% de su retroceso total desde 2004 a 2014, y solo el 18% restante correspondería al impacto del cambio climático.

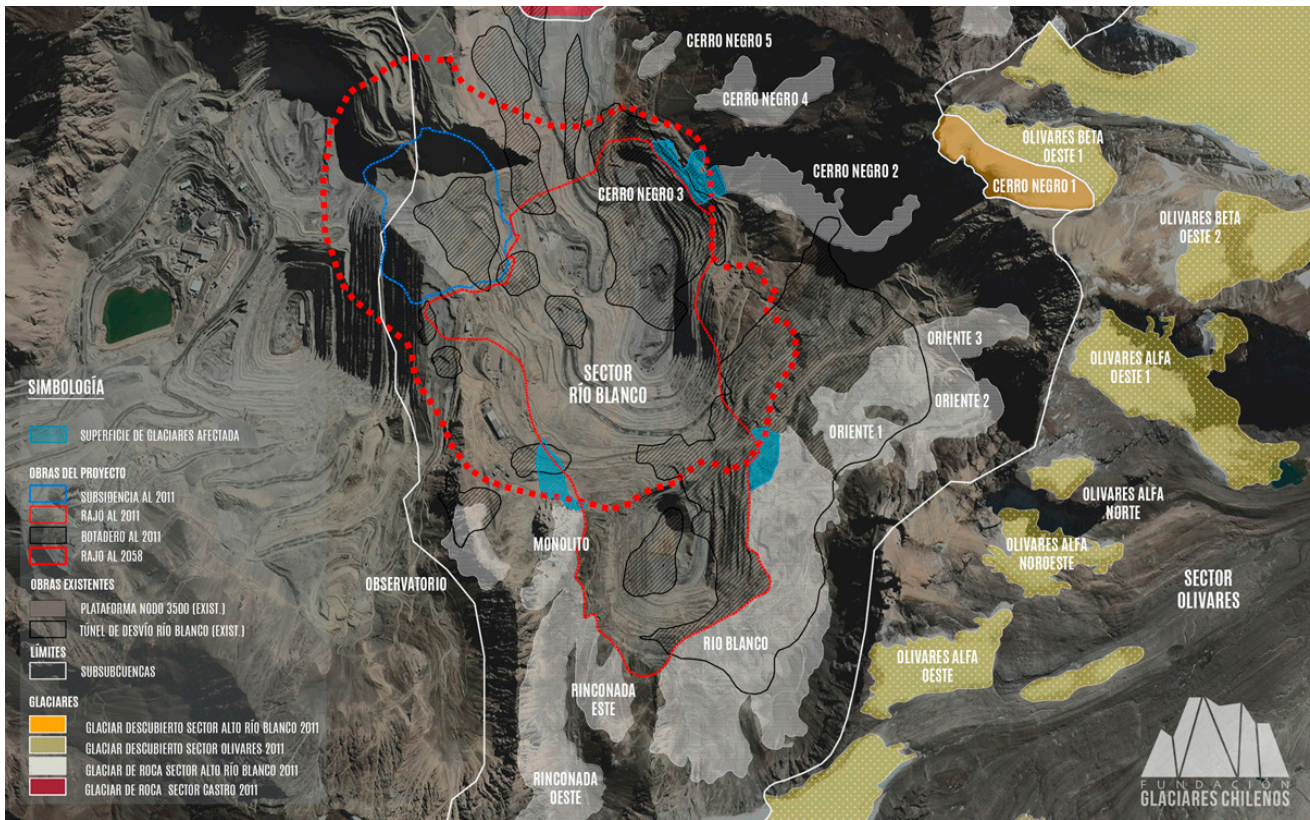


Figura 28. Glaciares intervenidos por los proyectos mineros División Andina y Los Bronces (Fundación Glaciares Chilenos).

Tabla 5. Área y volumen de glaciares de roca afectado por las minas División Andina y Los Bronces (fuente: Brenning, 2008).

	DIVISIÓN ANDINA	LOS BRONCES
Original rock-glacier area ^a (km ²)	2.6	1.9
Alteration until 1997 ^a		
Removed by open-pit mining (km ²)	0.5	0.2
Covered by waste rock deposits (km ²)	—	0.2
Affected by mining infrastructure (km ²)	0.2	0.4
Water equivalent affected until 1997 ^b (10 ⁶ m ³)	>5	>6
Alteration 1997-2005 ^c		
Removed by open-pit mining (km ²)	0.82	n.a.
Degraded (waste rock, infrastructure) (km ²)	0.58	n.a.
Water equivalent affected 1997-2005 ^b (10 ⁶ m ³)	10	n.a.

^aCalculated from aerial photographs (Hycon, no. 4300, and Geotec, flight Juncal, no. 5585) and the environmental impact studies of Geotécnica Consultores (1996) and Arcadis Geotécnica (2001).

^bCalculated assuming a minimum permafrost thickness of 20 m, an ice content of at least 40%, and an ice density of 0.9 g/cm³ (Brenning 2005b).

^cExpansion project of División Andina, data from Arcadis Geotécnica (2001).

CASO DE ESTUDIO: GLACIARES DE LA CUENCA DEL RÍO MAIPO

1. Estado actual de los glaciares en la cuenca del río Maipo
2. Proyecto de expansión minera Los Bronces Integrado
3. Glaciares no considerados en la evaluación ambiental del proyecto:
relevancia de los glaciares del río Olivares y del estero Yerba Loca



La cuenca del río Maipo contiene cerca de la mitad de toda la cobertura glaciar de Los Andes Centrales chilenos. Las principales zonas glaciológicas se ubican en las cabeceras de las cuencas del estero Yerba Loca (e.g., glaciares Paloma Este, Paloma Oeste y Altar Sur), del río Olivares (e.g., glaciares Olivares Alfa, Beta y Gamma y glaciar Juncal Sur), del río Colorado (e.g., glaciares del complejo volcánico Tupungatito), del río El Volcán (e.g., glaciar Loma Larga) y del estero El Yeso (e.g., glaciares Bello, Yeso y Pirámide).



Figura 29. Glaciar Bello (arriba) y Glaciar Yeso (abajo). Cuenca del estero El Yeso (fuente: Raúl Cisternas Novoa).

Castillo (2015) analizó la distribución espacial de los glaciares del Maipo a partir del Inventario de la DGA (IPG-2014) y del Modelo de Elevación Digital Aster GDEM. Se puede notar que la distribución espacial de la superficie glaciar obedece a ciertas variables fisiográficas, tales como la altitud, pendiente y exposición. La distribución altitudinal de los glaciares va desde aproximadamente los 2640 m s.n.m. a los 5650 m s.n.m., observando su mayor concentración entre los 3500 y los 4700 m s.n.m. Los glaciares cubiertos se concentran a menores alturas que los glaciares descubiertos, observándose su mayor concentración entorno a los 4000 m s.n.m., mientras que los descubiertos alcanzan su mayor concentración entorno a los 5000 m s.n.m. Si se analiza la distribución de

glaciares según pendientes, se tiene que el 55% de los glaciares se encuentra entre el 13 y el 43% de pendiente. Finalmente, se puede ver que el 87% de la superficie glaciar se encuentra en exposición sur, este u oeste, y sólo el 13% en exposición norte.

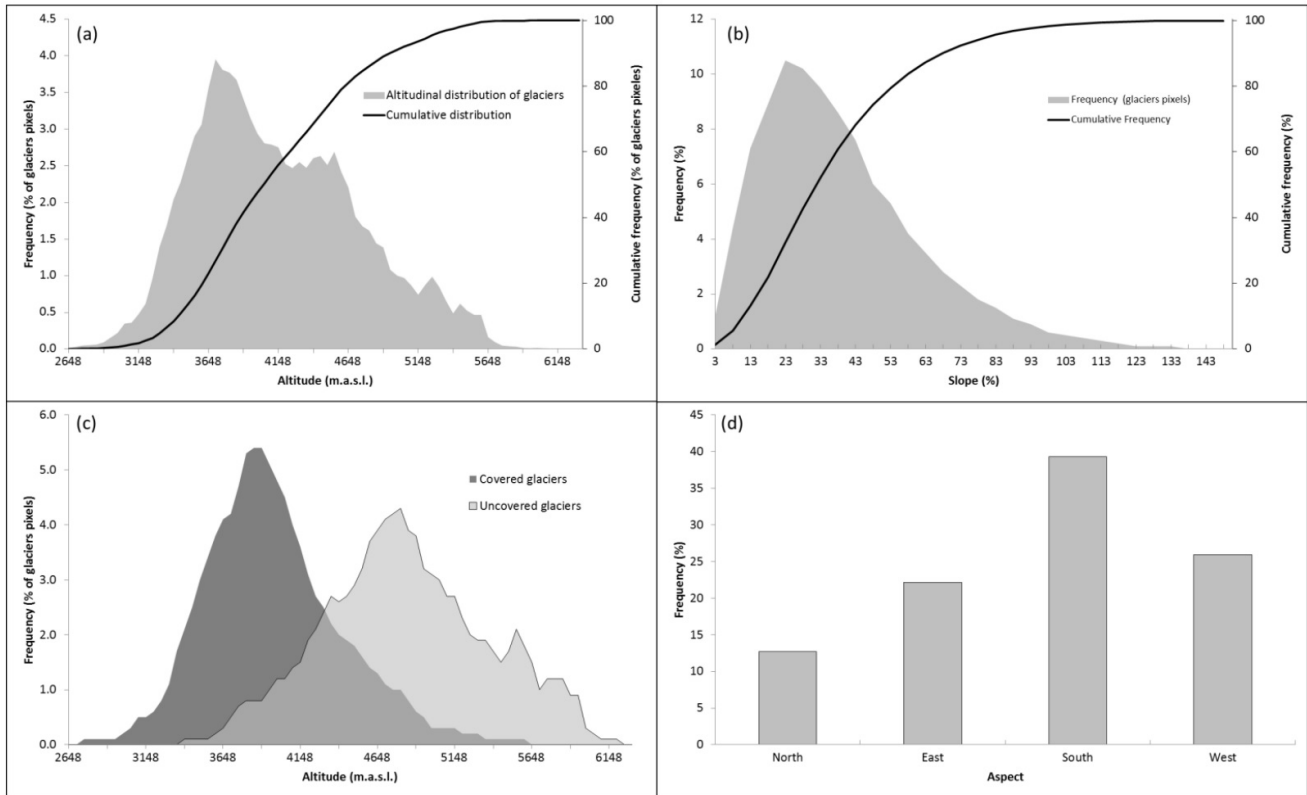


Figura 30. Características fisiográficas de los glaciares en la cuenca del Maipo. (a) Distribución altitudinal; (b) distribución según pendientes; (c) distribución altitudinal según tipo de glaciar; (d) distribución según exposición (fuente: Castillo, 2015).

5.1. Estado actual de los glaciares en la cuenca del río Maipo

En los glaciares de la cuenca del Maipo convergen diferentes factores que favorecen su derretimiento. Estos factores pueden ser tanto de origen natural como de origen antrópico: (i) cambio climático y el consecuente aumento de la temperatura y disminución de las precipitaciones, (ii) depositación de material particulado (polvo, BC, etc.) proveniente de faenas mineras, (iii) depositación de material particulado (polvo, BC, etc.) proveniente de la actividad industrial del Gran Santiago, (iv) destrucción total o parcial de glaciares durante las etapas de construcción y operación de faenas mineras, etc.

Por ejemplo, Cereceda et al. (2022) establecieron que el impacto de la minería en el glaciar Olivares Alpha podría ser responsable del 82% de su retroceso total desde 2004 a 2014, y solo el 18% restante correspondería al impacto del cambio climático.

Con respecto al potencial impacto de los contaminantes emitidos en el Gran Santiago y transportados a través de la atmósfera hasta los glaciares andinos, Lapere et al. (2021) encontraron que un patrón invernal plausible podría ser que el BC de Santiago sea arrastrado hacia la cordillera sureste consistentemente con los vientos del oeste inducidos por la circulación montañavalle, siendo la zona andina ubicada al sureste de la ciudad la más afectada por las emisiones de Santiago.

Variaciones frontales de los glaciares de la cuenca del Maipo

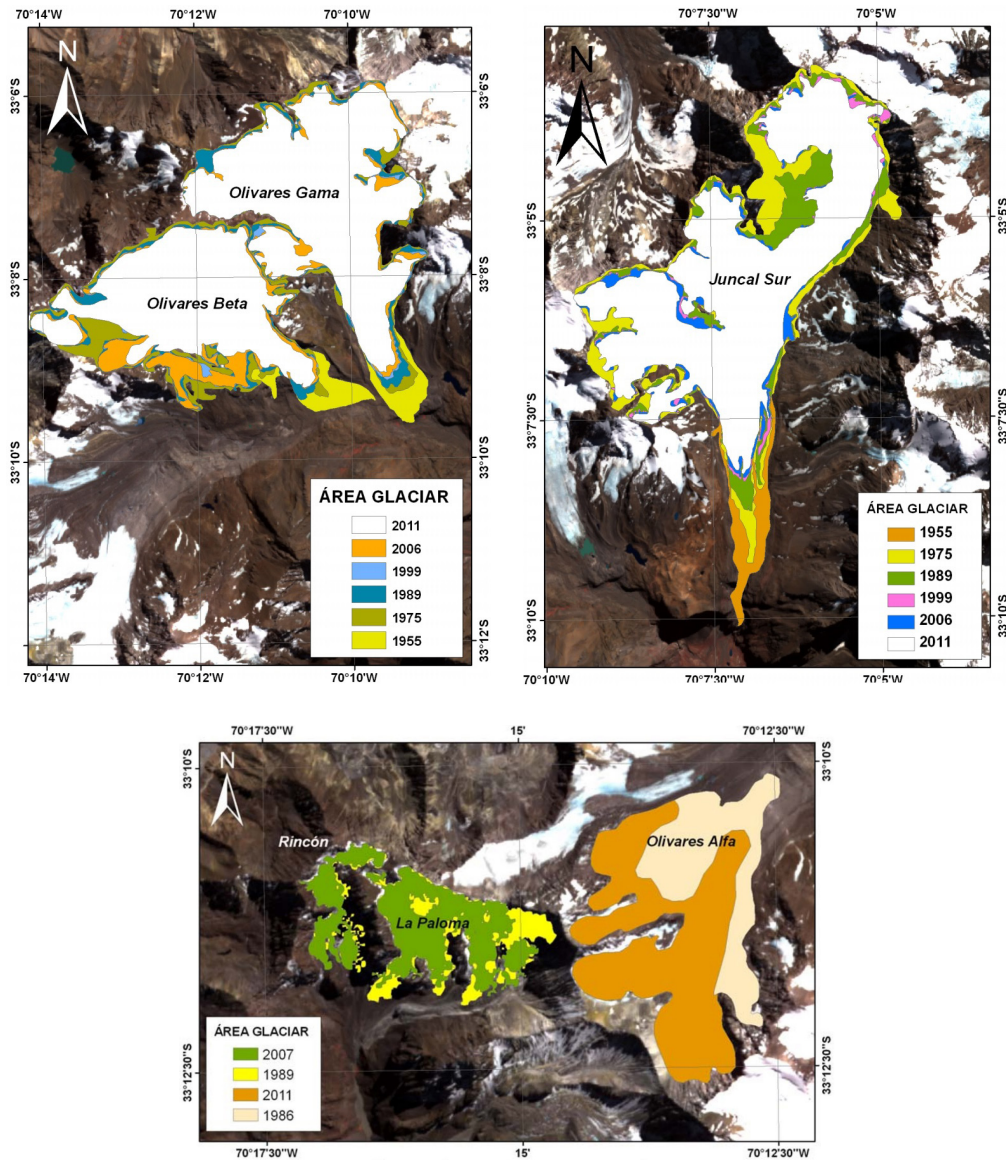


Figura 31. Variaciones frontales glaciares Olivares Gama, Olivares Beta y Juncal Sur (fuente: DGA, 2011).

En 2011 se realizó un esfuerzo por sintetizar la variación frontal reportada para los principales glaciares de los Andes Centrales chilenos (DGA, 2011). En la cuenca del Maipo, a la fecha, el Glaciar Juncal Sur mostraba un retroceso importante de escala interdecadal (79 m/año), con un cambio muy significativo a partir de 1955. Los glaciares Olivares Beta y Olivares Gamma, emplazados al poniente del glaciar Juncal sur, estaban unidos en 1935 cuando fueron avistados por Kruckel al ascender el Cerro Risopatrón (Lliboutry, 1956). Desde entonces, ha ocurrido un proceso de retroceso, separación y adelgazamiento.

El Glaciar Echaurren Norte es parte de un programa de medición de balance de masa de la DGA. En este glaciar se estableció que durante la ocurrencia de los eventos El Niño los balances de masa han sido positivos y, al contrario, han sido negativos en presencia de los eventos La Niña. Pese a esta fuerte variabilidad interanual, su balance de masa es negativo en el largo plazo (Rivera *et al.*, 2000).

Otros centros montañosos en la cuenca del Maipo experimentan cambios similares. Por ejemplo, la cobertura glaciaria en el Volcán San José se redujo un 30% en el período 1986-2010. Variaciones similares se reportaron en el complejo volcánico Tupungatito.

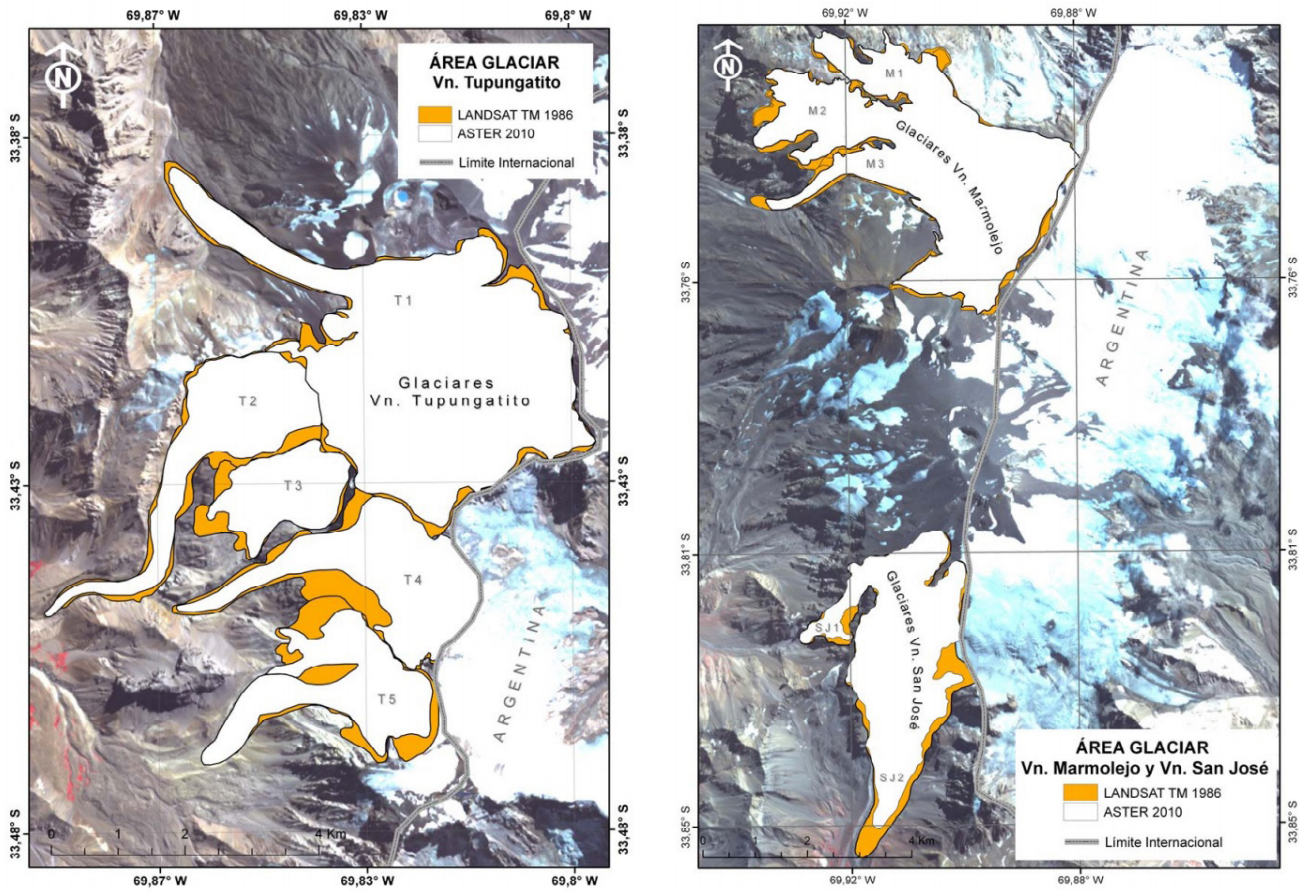


Figura 32. Variaciones frontales glaciares centros volcánicos Tupungato/Tupungatito y Marmolejo/San José (fuente: DGA, 2011).

Desde el 2010 ha habido una secuencia de años secos que se ha denominado Mega Sequía (Garreaud *et al.*, 2020). Además, se detectó un calentamiento de 0.25°C por década (Fariás- Barahona *et al.*, 2019). Dussailant *et al.* (2019) han demostrado que en los Andes Centrales ha habido una pérdida drástica reciente de glaciares que coincidió con la Mega Sequía. Numerosos trabajos recientes (Ayala *et al.*, 2016, 2020; Barcaza *et al.*, 2017; Fariás-Barahona *et al.*, 2020; Malmros *et al.*, 2016; Ruiz Pereira y Veettil, 2019; Shaw *et al.*, 2020) reportaron fuertes diferencias en el retroceso entre los glaciares de los Andes Centrales, y acordaron que estas diferencias no pueden explicarse completamente desde los aspectos climáticos y glaciológicos. En este sentido, varios estudios (Ayala *et al.*, 2020; Bellisario *et al.*, 2013; FariásBarahona *et al.*, 2020; Malmros *et al.*, 2016; Ruiz Pereira y Veettil, 2019) mencionaron explícitamente que la reducción significativa de algunos glaciares de la zona podría deberse a la deposición de partículas absorbentes de luz (LAP, por sus siglas en inglés).

Glaciares del Maipo y su aporte a la escorrentía

DGA (2015) y Ayala *et al.* (2016) elaboraron un modelo de derretimiento que mostró que durante un año seco el aporte de los glaciares Bello, Yeso y Pirámide a la cuenca del estero El Yeso - principal fuente de agua del Gran Santiago - fue de 42±8 % y 67±6% de la escorrentía anual y estival, respectivamente. En 2020 Ayala *et al.* extendieron el análisis a toda la cuenca del Maipo, encontrando que durante el período 1955-2016 el deshielo glaciar representó el 16±7% y 59±23% de la escorrentía anual y estival, respectivamente.

Como en el resto de los glaciares de Los Andes, en la cuenca del Maipo los caudales de deshielo glaciar alcanzaron su peak en el siglo pasado. Las proyecciones basadas en modelos climáticos globales muestran que, durante las próximas décadas, la escorrentía asociada al deshielo glaciar seguirá disminuyendo paulatinamente o, en el escenario más favorable, se mantendrá relativamente constante. Estas tendencias podrían modificarse si se consideran factores antrópicos, como el aumento en la depositación de material particulado sobre la superficie del hielo en glaciares cercanos a faenas mineras, factor que podría precipitar la desaparición de glaciares y, consecuentemente, generar una disminución del hielo disponible para la fusión.

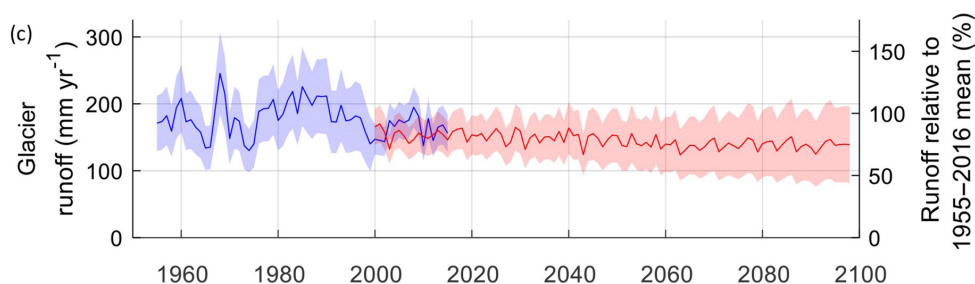


Figura 33. Variación de la escorrentía por deshielo glaciar en la cuenca del río Maipo. Período 1955-2016. Se incluye una proyección futura en base a modelos climáticos globales (fuente: Ayala et al., 2020).

Balance de masa Glaciares del Maipo

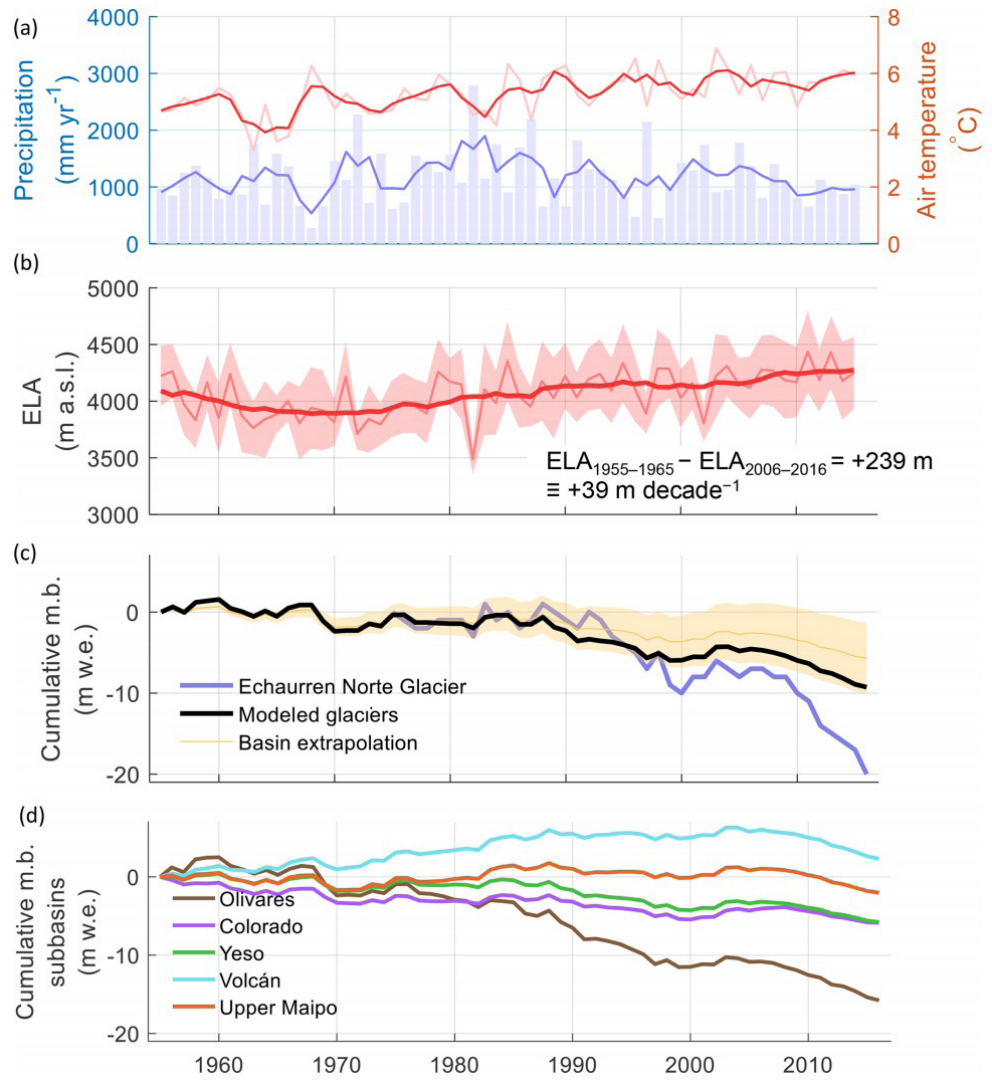
Estudios realizados por Fariás-Barahona et al. (2020) a partir de mediciones remotas indican un balance de masa glaciar regional promedio de -0.12 ± 0.06 m w.e./año para los Andes Centrales, con una pérdida de masa total de 2.43 ± 0.26 Gt para la cuenca del río Maipo entre 1955 y 2013. El balance de masa glaciar más negativo fue el de la subcuenca de Olivares, con un valor medio de -0.29 ± 0.07 m w.e./año. La respuesta anómala de los glaciares del Olivares es atribuible a la operación de faenas mineras en la cuenca contigua. Cereceda et al. (2022) establecieron que el impacto de la minería en el glaciar Olivares Alfa podría ser responsable del 82% de su retroceso total desde 2004 a 2014.

Tabla 6. Características de las principales subcuencas del Maipo con cobertura glaciar. Se incluye el balance de masa promedio y la contribución a la escorrentía por subcuenca (fuente: Ayala et al., 2020).

Basin	Mean elevation (m.a.s.l.)	Mean latitude (°S)	Glacierized area in 1955 (km ²)	Average annual glacier mass balance in 1995-2016 (m.w.e.yr ⁻¹)	Runoff contribution in 1995-2016 (mm w.e. yr ⁻¹)		Runoff contribution in the committed ice loss scenarios* (mm w.e. yr ⁻¹)	
					Total	Ice melt	Total	Ice melt
Olivares	3698	33.3	111	-0.26 ± 0.07	34.1 ± 7.9	15.8 ± 3.6	22.5 ± 6.1	5.4 ± 1.5
Colorado	3755	33.4	152	-0.10 ± 0.07	53.24 ± 12.2	16.1 ± 3.7	42.7 ± 11.5	6.4 ± 1.7
Yeso	3303	33.7	65	-0.09 ± 0.07	21.5 ± 4.9	7.5 ± 1.7	17.1 ± 4.6	3.6 ± 1.0
Volcán	3392	33.8	86	$+0.04 \pm 0.07$	24.2 ± 5.6	7.7 ± 1.8	20.0 ± 5.4	3.5 ± 1.0
Upper Maipo	3182	34.0	111	-0.03 ± 0.07	41.8 ± 9.6	12.6 ± 2.9	33.4 ± 9.0	4.4 ± 1.2
Maipo River basin	3175	33.6	532	-0.09 ± 0.07	176.9 ± 40.7	65.5 ± 15.1	138.6 ± 37.4	25.8 ± 7.0

* From the areas defined by the 1955 glacier outlines but normalized by the Maipo River basin area

Figura 34. Variabilidad componentes meteorológicas y glaciológicas en la cuenca del río Maipo para el período 1955-2016. (a) Temperatura del aire y precipitación; (b) elevación de la Línea de Equilibrio; (c) balance de masa acumulado en los glaciares simulados; (d) balance de masa acumulado por subcuenca (fuente: Ayala et al., 2020).



5.2. Proyecto de expansión minera Los Bronces Integrado

El rajo del proyecto minero Los Bronces se emplaza en la cabecera del río Blanco, subcuenca del río Aconcagua. La expansión del proyecto contempla la ampliación del rajo existente y la operación de una componente subterránea, ubicada en la cabecera del estero Yerba Loca, subcuenca del río Mapocho (que a su vez es una subcuenca del río Maipo). Este sector cordillerano ha estado sometido a fuertes presiones ambientales en las últimas décadas, toda vez que en la cuenca vecina del río San Francisco (subcuenca del río Mapocho) se emplaza, además, el proyecto minero División Andina, constituyendo un importante polo industrial y foco de emisiones.

5.2.1. Descripción del proyecto según Estudio de Impacto Ambiental

El proyecto de expansión Los Bronces Integrado corresponde al desarrollo de tres nuevas fases de explotación: una fase se localiza al oriente y otra al poniente del rajo actual, y una tercera fase subterránea ubicada al sur. Las fases oriente y poniente se ubican mayoritariamente en el sector cordillerano de la Región Metropolitana, en tanto que una parte menor se ubica en la Región de Valparaíso. La fase subterránea se encuentra aproximadamente 5 km al sur del rajo Los Bronces, por debajo de la superficie del extremo norte del Santuario de la Naturaleza Fundo Yerba Loca, a una profundidad media aproximada de 660 m.

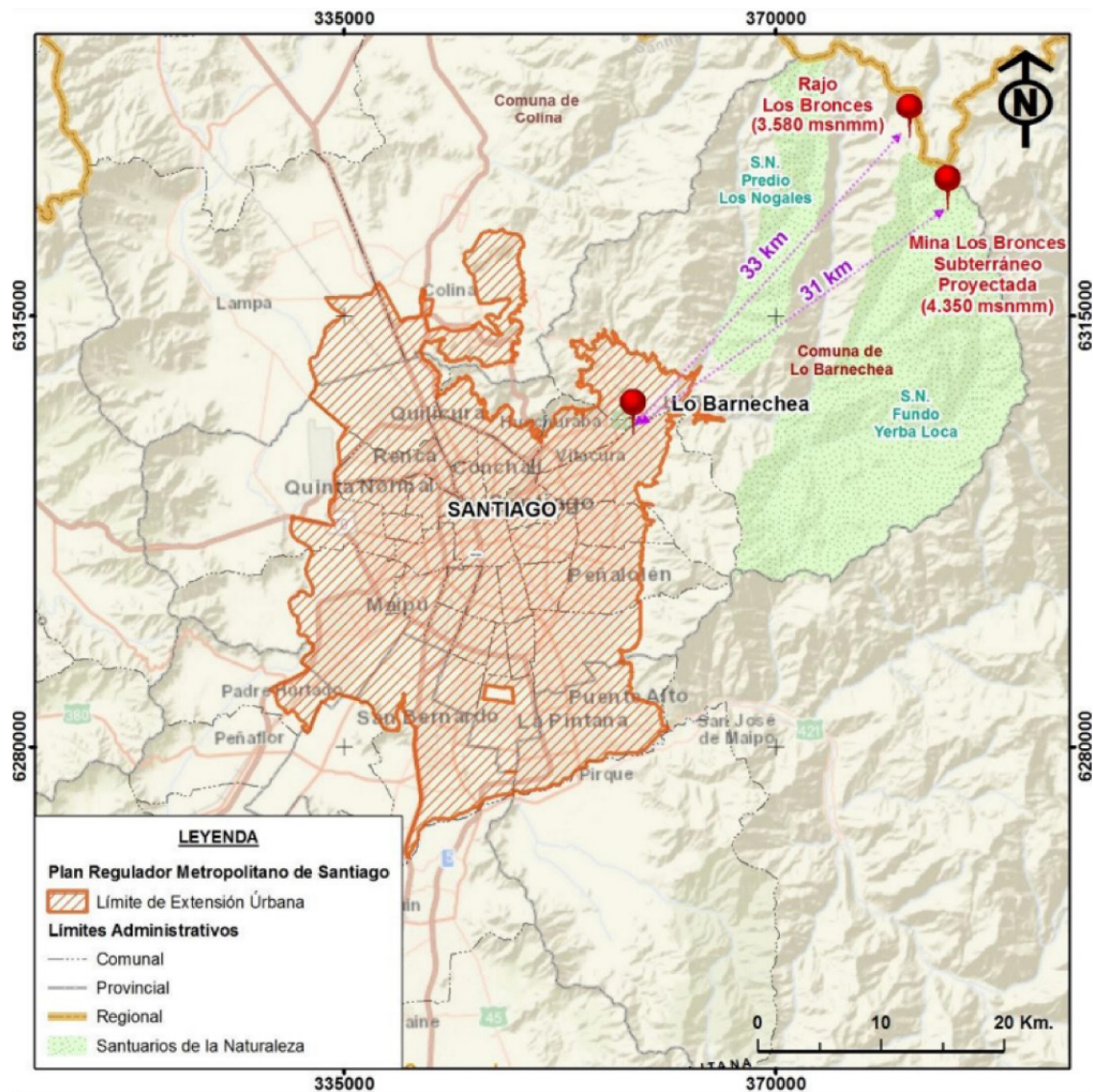


Figura 35. Ubicación proyecto Los Bronces Integrado (fuente: Estudio de Impacto Ambiental).

La fase oriente considera una ampliación del rajo hacia la zona minera de la División Andina de Codelco, y la fase poniente considera su ampliación hacia la zona industrial de la operación Los Bronces.

El desarrollo de las fases oriente y poniente de Los Bronces requiere construir nueva infraestructura para la gestión de las aguas de proceso y potenciar otras existentes, entre las que se cuentan: ampliación de la actual planta de neutralización en Los Bronces, rehabilitación de acondicionadores de cal en el sector San Francisco, dos nuevas estaciones elevadoras en el Sistema de Recirculación de Aguas existente (una en Área Sistema de Transportes (STP) y otra en Área Los Bronces), además de obras lineales para el transporte de agua y energía.

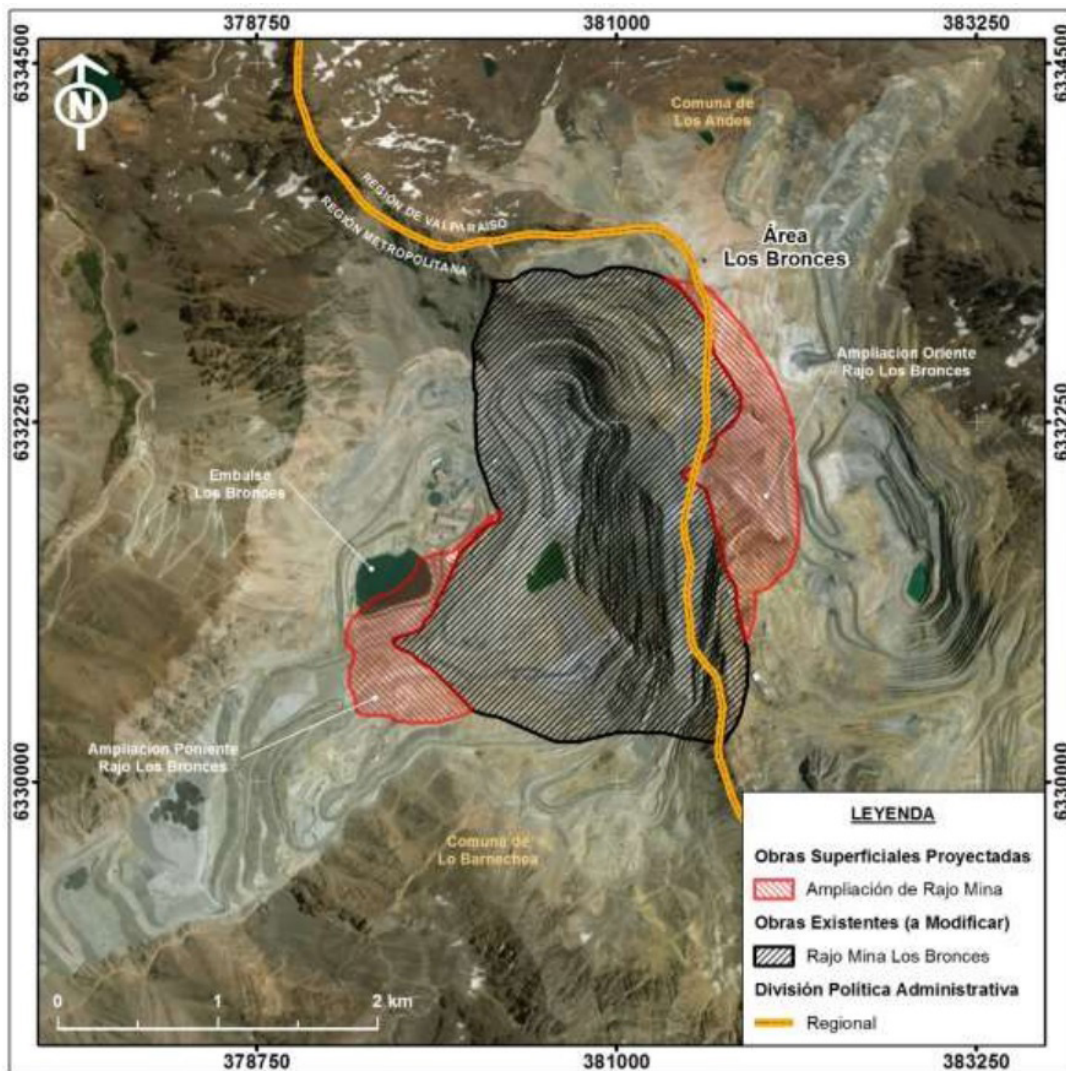


Figura 36. Proyecto Los Bronces Integrado. Ampliación rajo Los Bronces (fuente: Estudio de Impacto Ambiental).

Por otro lado, la fase subterránea ocupa un área de 95 hectáreas bajo tierra. El método seleccionado para su explotación corresponde a la excavación del mineral en sentido vertical dejando espacios vacíos, denominados caserones, que se rellenarán con una mezcla mayoritariamente de roca molida (97% aprox.) y cemento (3% aprox.), dejando entre ellos pilares para asegurar su estabilidad y evitar desplazamientos verticales que puedan producir hundimiento superficial. Este método minero es conocido internacionalmente como una variante del “Sublevel Stopping”, denominado “Sublevel Stopping con pilares y relleno de caserones”, que se adapta a la geología local. Para el desarrollo de esta fase, se requiere de la construcción de túneles de acceso, ventilación y extracción de mineral, los cuales tendrán su ingreso desde la mina Los Bronces.

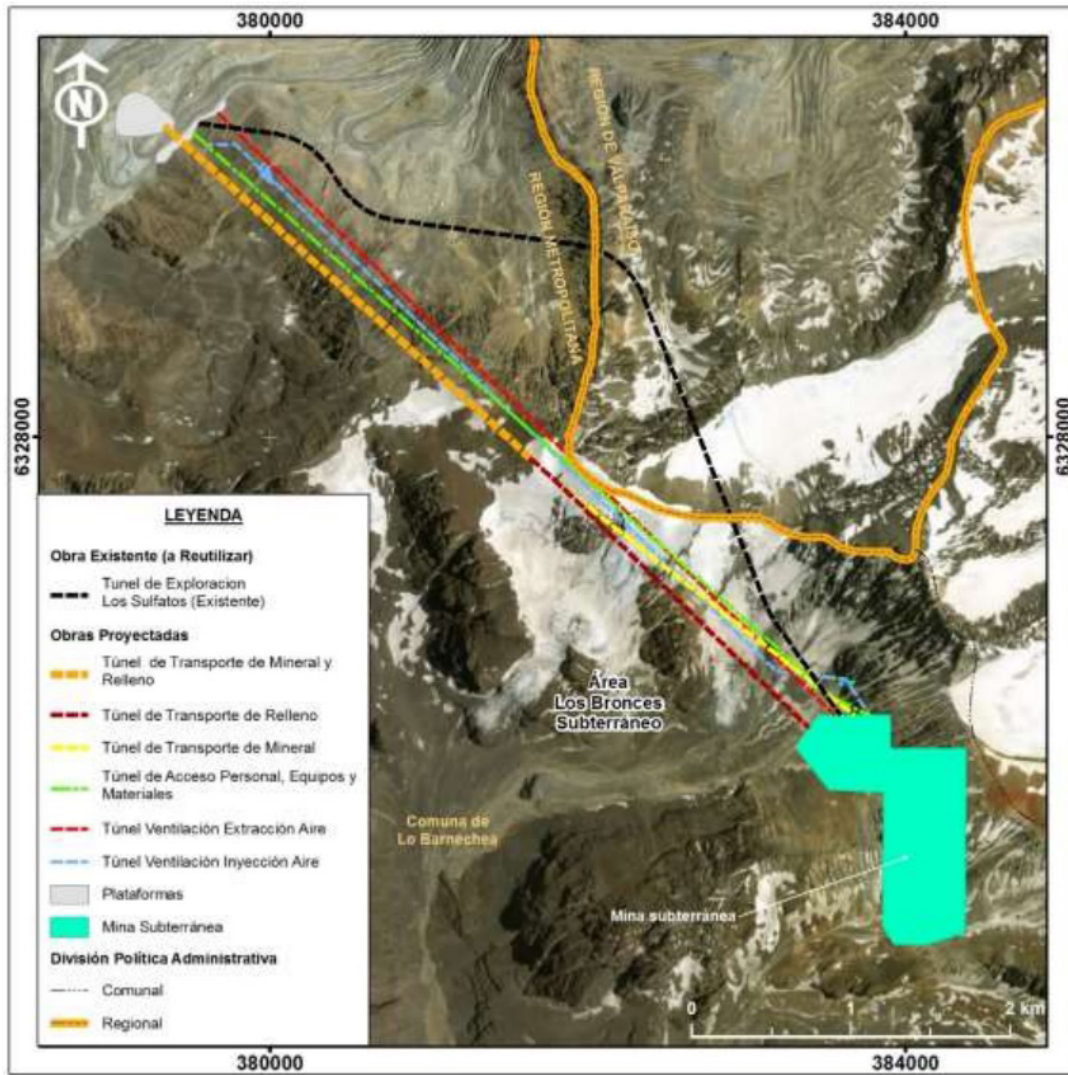


Figura 37. Proyecto Los Bronces Integrado. Principales obras Los Bronces Subterráneo (fuente: Estudio de Impacto Ambiental).

5.2.2. Área de Influencia definida en el EIA – componente Glaciares

Los potenciales impactos para el componente Glaciares considerados en el Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Los Bronces Integrado son los siguientes:

- Material Particulado en Suspensión (MPS): efecto adverso sobre glaciares que genere una alteración de sus aportes hídricos por depositación de MPS;
- Vibraciones: efecto adverso sobre glaciares en su desplazamiento natural ocasionadas por vibraciones generadas por el Proyecto.

Durante la evaluación ambiental del Proyecto (ver Adenda Complementaria de noviembre de 2021, y Adenda PAC Parte 2 de 3 de septiembre 2020) el titular afirmó que en el área donde se concentran las fuentes de emisión de Los Bronces el viento es predominante desde el Noreste, proyectando primariamente la pluma de dispersión en dirección hacia el suroeste, como se manifiesta en el Anexo CyM-1 de la Línea Base para la Estación Los Bronces, aseverando también que la pluma de dispersión de contaminantes atmosféricos no se transporta en la dirección del glaciar Olivares Alfa.

El titular expuso, además, que el área de influencia se encuentra definida por los niveles de vibración y no por el material particulado en suspensión. De esta forma, Anglo American descartó realizar estudios, mediciones o modelaciones en los glaciares de la cuenca Olivares o en los glaciares de la cuenca del estero Yerba Loca (a excepción del glaciar Altar Sur).

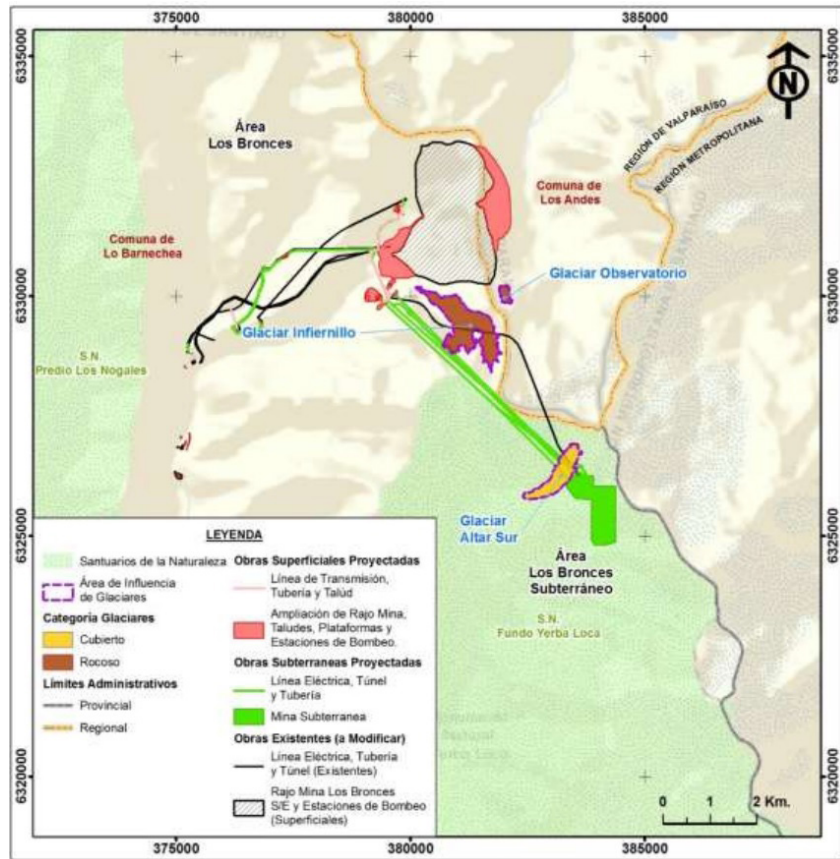


Figura 38. Área de Influencia, Componente Glaciares (fuente: Estudio de Impacto Ambiental).

Tabla 7. Glaciares dentro del Área de Influencia considerada en el EIA. Los Bronces Integrado.

Sector	Glaciar	Tipo	Superficie (há)
Los Bronces	Infiernillo Observatorio	Rocoso	104
		Rocoso	7.1
Los Bronces Subterráneo	Altar Sur	Descubierto (parte alta) Cubierto (parte baja)	47

5.2.3. Análisis crítico Área de Influencia definida en el EIA – componente Glaciares

En el proceso de evaluación ambiental del Proyecto (ver Adenda Complementaria de noviembre de 2021) se presentó evidencia fotográfica del proyecto “NUNATAKCHILE”, Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM, 2014), y del informe “Criósfera de la Cuenca del Río Mapocho: Hielos en Peligro”, que muestra el transporte de partículas contaminantes a los sistemas glaciares y periglaciares colindantes a Los Bronces, indicándose que los impactos negativos de la actividad minera sobre los glaciares trascienden ampliamente los límites determinados por el titular, toda vez que los glaciares colindantes a las faenas superficiales del proyecto son evidentemente impactados. Además, se aporta evidencia científica de que los glaciares ubicados en un radio de 9 km o más, presentan alteraciones en su composición superficial que se asocian directamente a la actividad minera, como es el caso del glaciar Olivares Alfa.



Figura 39. Foto aérea en aproximación a la parte suroriente de las faenas mineras extractivas (fuente: CETAM-UTFSM, 2014).

Evidencia reciente de afectación a glaciares en las cuencas del río Olivares y del estero Yerba Loca

En 2022, Cereceda et al. establecieron el balance de masa para 301 glaciares con una superficie mayor a 0.5 km² emplazados a menos de 100 km de faenas mineras a rajo abierto. Los resultados mostraron que los glaciares que se emplazan más cerca de faenas mineras (5 km, aproximadamente) tienen el balance de masa más negativo de la muestra, como el glaciar Olivares Alfa (OAG) y el glaciar Paloma Norte (PNG).

Para comprender el comportamiento anómalo de estos glaciares, se comparó la dinámica del glaciar Olivares Alfa con el comportamiento observado en el glaciar Bello. Este último se escogió como glaciar patrón, toda vez que su tamaño, orientación y elevación son comparables con las características del glaciar Olivares Alfa, además de encontrarse lejos de faenas mineras en operación (50 km, aproximadamente). Los resultados del muestreo de polvo y BC indican que las concentraciones observadas en el glaciar Olivares Alfa son uno o dos órdenes de magnitud superiores a las observadas en el glaciar Bello. Al comparar la pérdida de masa de ambos glaciares durante el período 2004-2014, se estimó que para el período de estudio el impacto en el retroceso glaciar debido a la actividad minera en el glaciar Olivares Alfa corresponde al 82% del total, y solo el 18% restante correspondería al efecto del cambio climático.

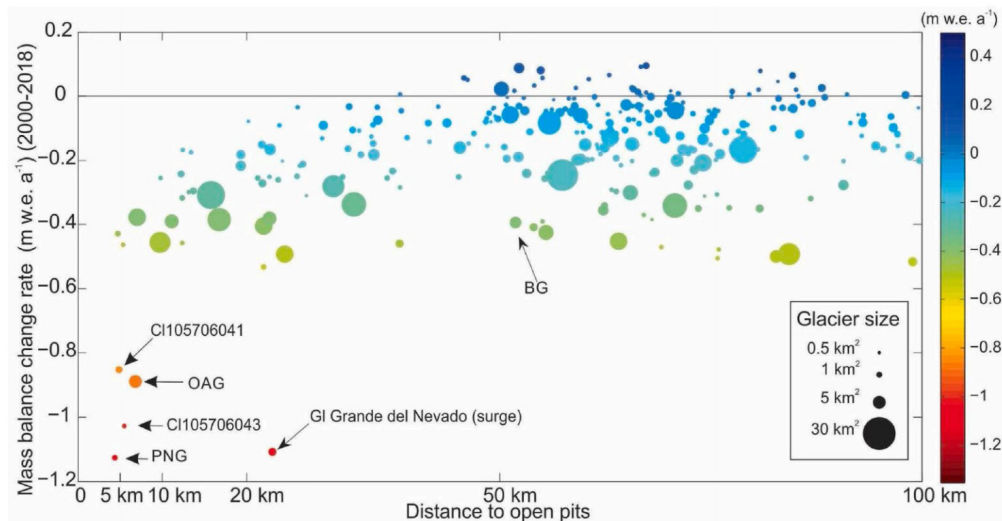


Figura 40. Balance de masa superficial de glaciares cercanos a faenas mineras a rajo abierto (<math>< 100\text{ km}</math>). El tamaño del círculo es proporcional al tamaño del glaciar. Los glaciares con balance de masa más negativo corresponden a los más cercanos a faenas mineras (fuente: Cereceda et al., 2022).

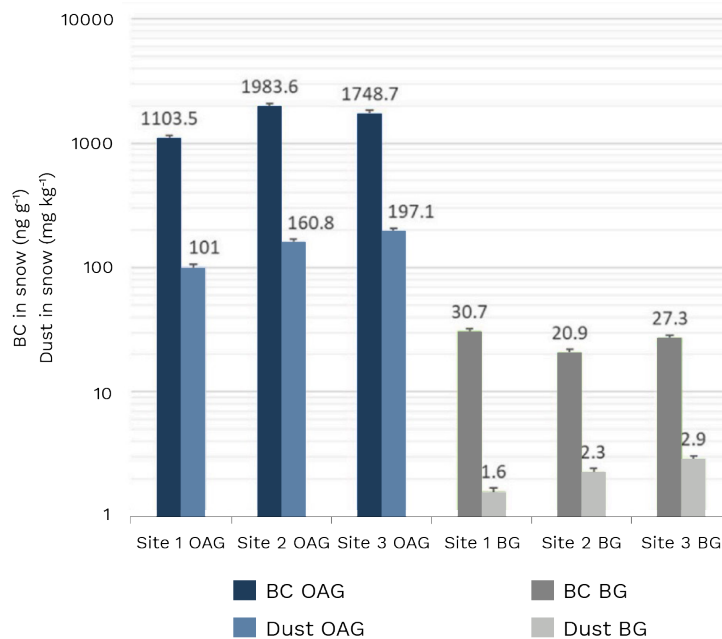


Figura 41. Concentración de Black Carbon (ng/g) y concentración de Polvo (mg/kg) en muestras de nieve obtenidas en Glaciar Olivares Alfa (OAG) y Glaciar Bello (BG). El eje vertical se muestra en escala logarítmica para una mejor visualización (fuente: Cereceda et al., 2022).

La investigación de Barandun et al. (2022) verifica las conclusiones establecidas por Cereceda et al. (2022). Barandun y su equipo determinaron que hasta el 99% del material particulado muestreado en los glaciares de la cuenca del río Olivares provienen de los relaves de las faenas mineras adyacentes, acumulándose en un proceso de más de 50 años de duración. Se presenta evidencia de que las partículas minerales movilizadas por las actividades mineras han sido transportadas y depositadas en la superficie de los glaciares Olivares Alfa y Paloma Norte, principalmente: (i) jarosita formada solo en los relaves de la mina y (ii) partículas con estructura típica de brecha. Esas partículas han sido transportadas desde la zona minera de acuerdo con los patrones de viento dominantes y el monitoreo de aerosoles. Los glaciares con mayor concentración de material particulado registran las mayores pérdidas de masa.

Tabla 8. Porcentaje de elementos con contenido de hierro encontrados en muestras superficiales y testigos de nieve/hielo (fuente: Barandun et al., 2022).

Sample location	Iron oxides	Iron sulfides	Jarosite
Paloma Norte	5.0%	1.0%	0.7%
Olivares Alfa	1-2%	1.5%	2.5%
Olivares Beta	1-2%	1.0%	-
Juncal Sur	1-2%	-	-
Barroso IV	1-2%	-	-
Cerro Negro _{surface2019}	5.5%	2.3%	0.3%
Cerro Negro ₁₉₆₁₋₂₀₁₇	2.2%	1.7%	0.2%
Cerro Negro ₁₉₄₅	2.7%	1.7%	1.5%
Cerro Negro ₁₉₃₇	2.0%	1.8%	1.8%

A partir de los antecedentes expuestos, se concluye que el Área de Influencia propuesta en el EIA del Proyecto es insuficiente, toda vez que ésta excluye a los glaciares de la cuenca del río Olivares, cuyo balance de masa promedio mostró ser el más negativo de Los Andes Centrales, con una pérdida de hielo de -0.29 m w.e./año (Fariás-Barahona et al., 2020). Particularmente, las altas concentraciones de polvo y BC observadas en el glaciar Olivares Alfa indican que su derretimiento acelerado está controlado, principalmente, por la depositación de material particulado proveniente de las faenas mineras adyacentes. Asimismo, el Área de Influencia propuesta en el EIA del Proyecto excluye a los glaciares de la cuenca del estero Yerba Loca (a excepción del glaciar Altar Sur). En esta cuenca, el glaciar Paloma Norte muestra el balance de masa más negativo de los 301 glaciares analizados por Cereceda et al. (2022).

Problemas en la modelación de vientos propuesta en el EIA

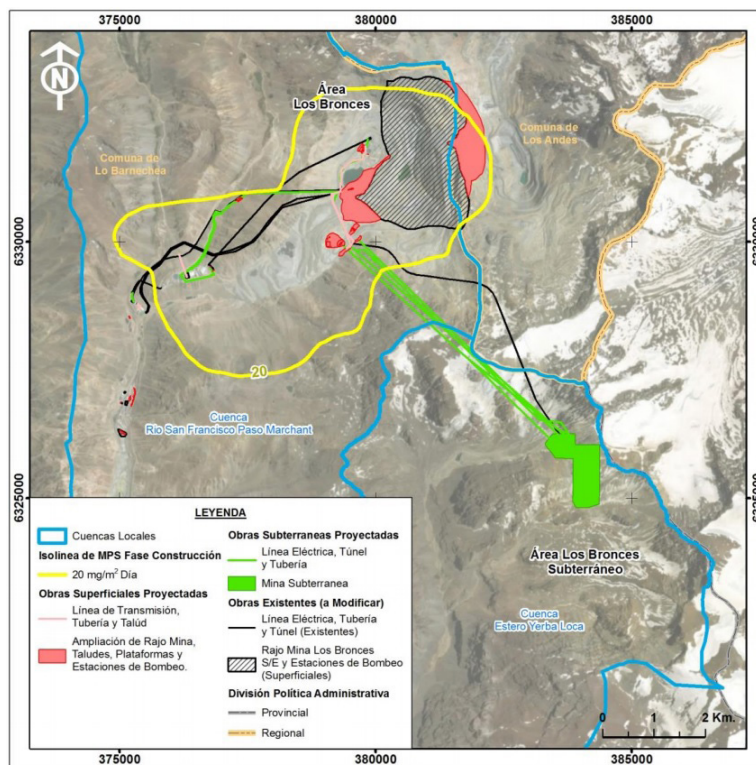


Figura 42. Evaluación Proyecto Los Bronces Integrado. Isótopos de deposición límite para evaluar impactos en glaciares por MPS. Fase de construcción (fuente: Estudio de Impacto Ambiental).

En el proceso de evaluación ambiental el titular del Proyecto afirmó que en el área donde se concentran las fuentes de emisión de Los Bronces el viento predominante sopla desde el noreste, proyectando la pluma de dispersión en dirección suroeste, aseverando también que la pluma de dispersión de contaminantes atmosféricos no se transporta en la dirección del glaciar Olivares Alfa, situación que no se condice con la evidencia empírica.

La modelación de vientos propuesta por el titular sólo consideró mediciones superficiales. Se estaría obviando, por lo tanto, la ocurrencia de vientos en altura que explicarían la depositación de material particulado sobre la superficie de los glaciares de las cuencas adyacentes (Olivares y Yerba Loca).

Con el fin de validar técnicamente la presencia de vientos noroeste/oeste en alturas mayores a las medidas por el titular, Fundación Terram (2022) presentó una modelación numérica de la atmósfera con el programa WRF que cumple con los estándares establecidos por el Servicio de Evaluación Ambiental, respaldando su uso para el estudio del viento. A continuación, se muestran los resultados de la modelación. Los resultados se muestran a partir de rosas de los vientos ubicadas sobre los lugares de origen. Las rosas de los vientos fueron calculadas usando todos los datos horarios simulados en el verano del 2017, ya que este año fue elegido por el titular como base de estudio de la línea de base meteorológica y de calidad de aire.

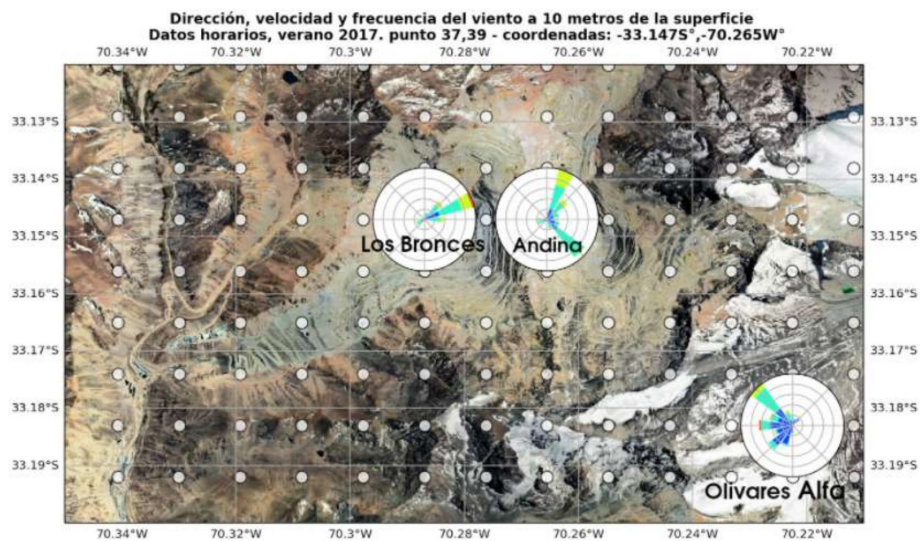


Figura 43. Viento a 10 m de la superficie, usando datos horarios calculados por WRF para el verano del 2017 (fuente: Terram, 2022).

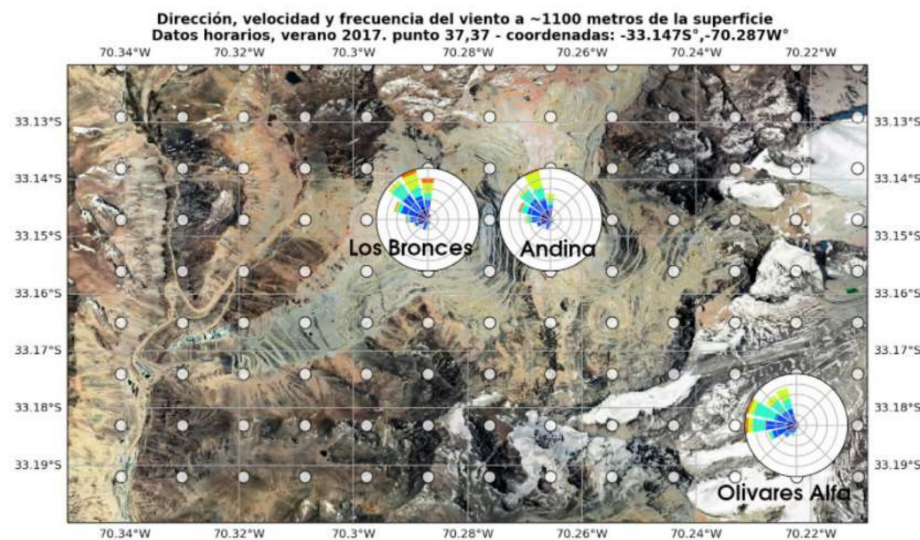


Figura 44. Viento a 1100 m sobre la superficie, aproximadamente, usando datos horarios calculados por WRF para el verano del 2017 (fuente: Terram, 2022).

Se observa presencia de viento noroeste en altura desde los 700 m sobre el nivel de la superficie. Este viento noroeste comienza a ser más intenso a mayor altura, en concordancia con el viento noroeste predominante en altura en estas latitudes. Estos resultados son coherentes con las conclusiones establecidas por Cereceda et al. (2022) y Barandun et al. (2022), quienes encontraron altas concentraciones de material particulado asociado a la actividad minera en los glaciares Olivares Alfa y Paloma Norte, ubicados al suroeste del complejo minero Andina/ Los Bronces.

Problemas en la modelación de vibraciones propuesta en el EIA

La caracterización de esta componente consideró sólo aquellos glaciares más cercanos a las obras del Proyecto. Los glaciares considerados corresponden, en el caso del Área Los Bronces, a los glaciares Infiernillo y Observatorio (ambos glaciares rocosos), y para el Área Los Bronces Subterráneo el glaciar Altar Sur (glaciar cubierto).

Tabla 9. Distancia mínima a glaciares. Estudio de vibraciones EIA Proyecto Los Bronces Integrado (fuente: EIA Los Bronces Integrado).

Glaciar	Obra	Distancia (m)	Distancia Escalar Crítica [m/KgR]	Explosivo por Retardo [KgR]	PPV [mm/s]
FASE DE CONSTRUCCIÓN					
Infiernillo Sur	Túnel de Acceso	460	5,7	100	6,3
Infiernillo Sur	Túnel de Extracción	300	14,0	100	8,2
Altar Sur	Túnel de Extracción	170	14,0	100	21,4
FASE DE OPERACIÓN					
Infiernillo Sur	Rajo Poniente	240	5,7	800	22,0
Observatorio	Rajo Oriente	670	5,7	800	10,3
Altar Sur	Mina Subterránea	200	14,0	180	26,8

El valor de corte que asegura cero impactos en los glaciares evaluados corresponde a una velocidad de partícula máxima admisible (PPV máxima). El establecimiento de la PPV máxima se realizó según el criterio de deslizamiento basal, por lo que se propuso un modelo de bloque deslizante. No obstante, si bien efectivamente un eventual deslizamiento basal podría estar asociado a inestabilidad de un glaciar, el titular no consideró otros criterios de falla igualmente relevantes, como la inestabilidad del frente terminal de un glaciar, factor particularmente relevante en la evaluación de glaciares rocosos (glaciares Infiernillo y Observatorio). Por lo tanto, se requiere ampliar los criterios de falla de un glaciar considerados en el estudio de vibraciones.

Por otro lado, además de la distancia a la fuente de vibraciones (tronaduras), el cálculo de la PPV requiere conocer la pendiente superficial del glaciar evaluado. En el estudio propuesto por el titular se consideró una pendiente media de 22° para todos los glaciares (resultando en una PPV máxima igual a 29.7 mm/s). No obstante, si bien la pendiente empleada permite una adecuada caracterización del glaciar Altar Sur, se observa que los demás glaciares de la cuenca del estero Yerba Loca (cercaños al Área Los Bronces Subterráneo) tienen pendientes del orden de 40-60%, por lo que en estos casos se podría estar superando el umbral estimado (29.7 mm/s). Por lo tanto, se requiere evaluar la PPV de todos los glaciares de la cuenca del estero Yerba Loca (Del Rincón, Paloma Este, Paloma Oeste).

Recomendaciones para una adecuada definición del Área de Influencia

El modelo de vientos debe estar calibrado con datos medidos a diferentes alturas. A partir de esto se debe redefinir el área de depositación. Según los antecedentes recopilados, el Área de Influencia debe incluir, al menos, a los

glaciares Olivares Alfa y Paloma Norte, extendiéndose eventualmente hasta los glaciares Olivares Beta, Olivares Gama, Paloma Norte, Paloma Este, Paloma Oeste y Glaciar del Rincón.

Se deben ampliar los criterios de falla de un glaciar considerados en el estudio de vibraciones. Particularmente, es poco probable que un glaciar rocoso falle por deslizamiento basal, por lo que se debe considerar la inestabilidad del frente glaciar como criterio de falla prioritario. Con respecto al cálculo de la PPV máxima admisible, se debe incluir a todos los glaciares cercanos a fuentes de tronadura, individualizando la pendiente superficial de cada uno. La PPV máxima admisible corresponderá a la más restrictiva.

Ilustrativamente, en las figuras siguientes se trazó un buffer de 9 km de radio con respecto al centro del rajo Los Bronces y se resaltaron los principales glaciares de las cuencas del estero Yerba Loca y del río Olivares. Según los antecedentes recopilados en este reporte, los glaciares resaltados corresponden al Área de Influencia mínima a evaluar ambientalmente desde la perspectiva del componente Glaciares.

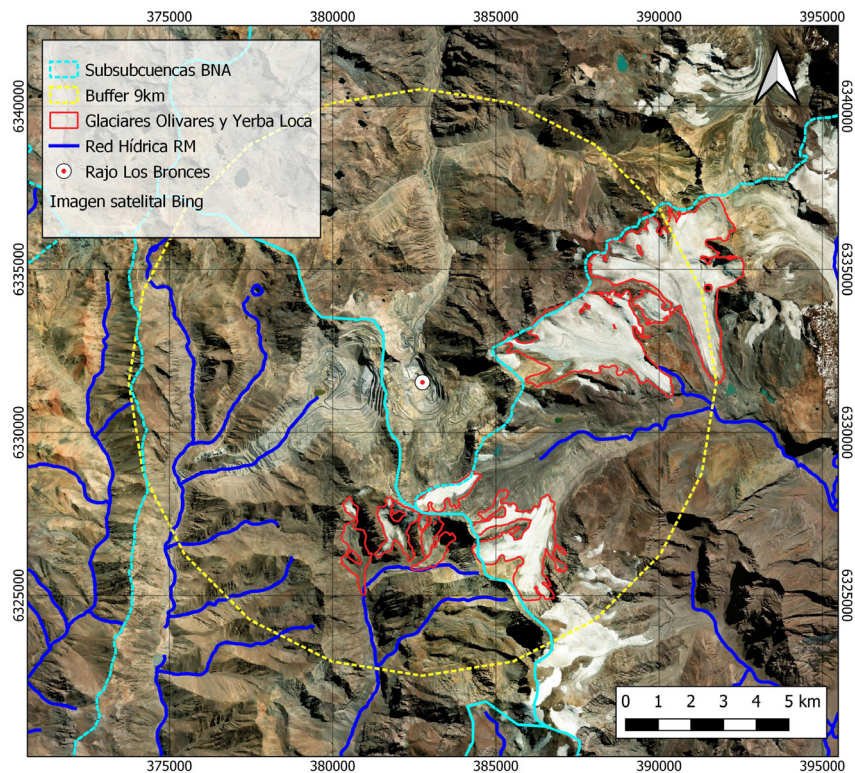


Figura 45. Glaciares relevantes próximos al rajo principal del Proyecto Los Bronces. Referencialmente, se ha considerado un buffer de 9 km medidos desde el centro del rajo (fuente: elaboración propia).

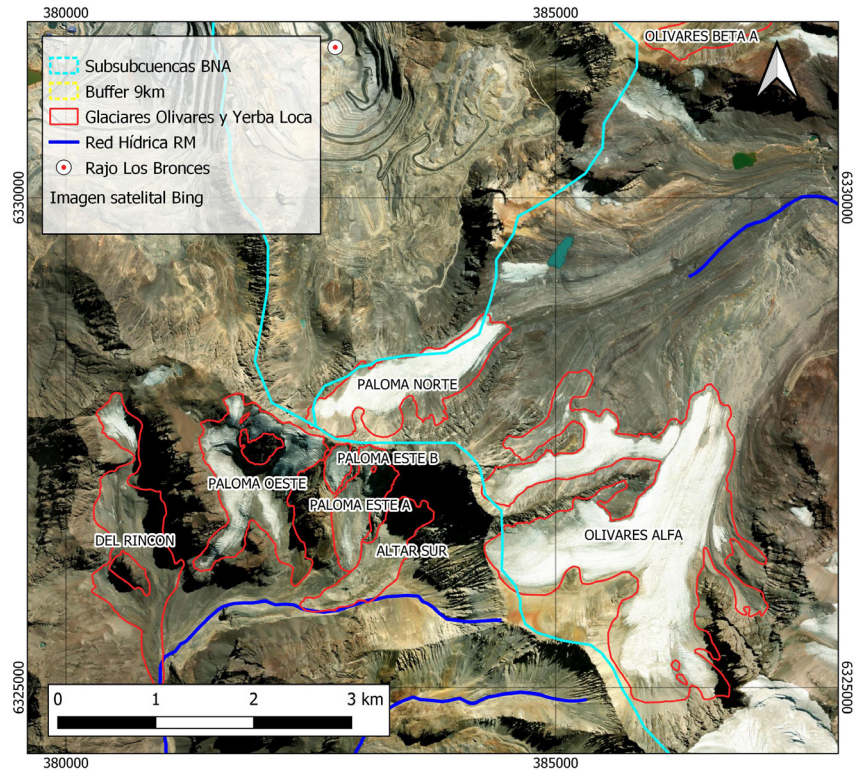


Figura 46. Glaciares relevantes próximos al rajo principal del Proyecto Los Bronces (acercamiento sector sureste) (fuente: elaboración propia).

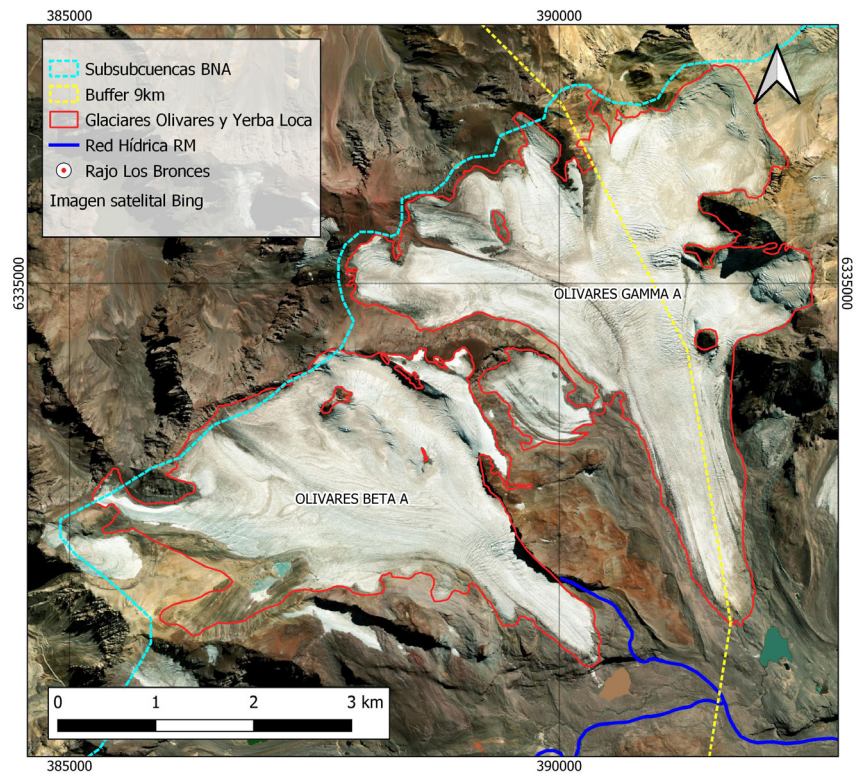


Figura 47. Glaciares relevantes próximos al rajo principal del Proyecto Los Bronces (acercamiento sector este) (fuente: elaboración propia).

5.3. Glaciares no considerados en la evaluación ambiental del proyecto: relevancia de los glaciares del río Olivares y del estero Yerba Loca

Como se comentó en el acápite anterior, el Área de Influencia para la componente Glaciares considerada en la evaluación ambiental del Proyecto adolece de falencias técnicas que deben ser corregidas. El AI propuesta excluye importantes glaciares ubicados en la cabecera del estero Yerba Loca y en la cabecera del río Olivares. Sin embargo, las investigaciones recientes han demostrado que el derretimiento acelerado de los glaciares Olivares Alfa y Paloma Norte se explica principalmente por la depositación de material particulado proveniente de las faenas mineras adyacentes. Los glaciares excluidos de la evaluación ambiental, además, se emplazan en Áreas Protegidas con relevancia ambiental, por lo que su conservación es especialmente importante.

Yerba Loca es un Santuario de la Naturaleza ubicado en la Cordillera de los Andes, en Santiago de Chile, en la comuna de Lo Barnechea. El Santuario debe su nombre al Estero Yerba Loca, el cual se abre paso desde el glaciar La Paloma, a más de 3.900 metros de altitud. Por su origen principalmente nival, el caudal del estero disminuye en invierno cuando la nieve y el hielo permanecen congelados. En primavera, al comenzar los deshielos, el estero aumenta su volumen permitiendo el surgimiento de la vida en toda su cuenca. Sus aguas no son aptas para el consumo humano puesto que poseen altas concentraciones de sales de hierro, provenientes de las rocas que drenan sus afluentes: el estero La Leonera y el Chorrillos del Plomo.

El Parque Nacional Glaciares de Santiago tiene una superficie de 75.114 há, se ubica en la comuna de San José de Maipo, provincia de Cordillera de la Región Metropolitana, y abarca los territorios comprendidos por la parte alta de las cuencas de los ríos Olivares y Colorado (sobre los 3.600 msnm). De la superficie total de esta nueva área protegida, 20.760 há corresponden a glaciares (27,6%), resaltando los glaciares Olivares Alfa, Beta y Gamma, Glaciar Juncal Sur y Glaciar Volcán Tupungatito, que contribuyen fundamentalmente a la disponibilidad y regulación del régimen hídrico de la Región Metropolitana.

La cuenca del río Olivares se caracteriza por tener una importante presencia glaciar. Según el catastro de la DGA realizado el año 2009, a la fecha existía un total de 80 glaciares, dentro de los que destacan los glaciares Juncal Sur, Olivares Alfa, Beta y Gamma, con áreas de 25.7, 11.2, 11.5 y 12.7 km², respectivamente, representando, en conjunto, un 67% del total del área glaciar de la cuenca (información asociada al año 1986). Los glaciares se encuentran aproximadamente entre los 3500 y 6000 m s.n.m.

Al analizar la información de las imágenes del satélite Landsat, se puede observar que los glaciares del Olivares han registrado importantes retrocesos, siendo el área glaciar de 91.2 km² en el año 1986, mientras que en el año 2015 disminuyó a 60.9 km², representando una variación de un 33% (Cepeda, 2017). En 2017 Cepeda analizó los caudales nivo-glaciares de la cuenca del río Olivares aguas arriba de su confluencia con el río Colorado y presentó algunas proyecciones futuras. Según sus resultados, como sucede con la mayoría de los glaciares de Los Andes Centrales, el caudal de deshielo de los glaciares del Olivares alcanzó su máximo durante el siglo pasado, por lo que las proyecciones futuras muestran una disminución sostenida del caudal glaciar medio anual. Las estimaciones de Cepeda indican, además, que a fines de este siglo el volumen de hielo en la cuenca del Olivares será marginal. Estas estimaciones no consideran el efecto que tendría un aumento en la concentración de material particulado en la superficie del hielo, por lo que el escenario futuro puede ser aún más crítico.

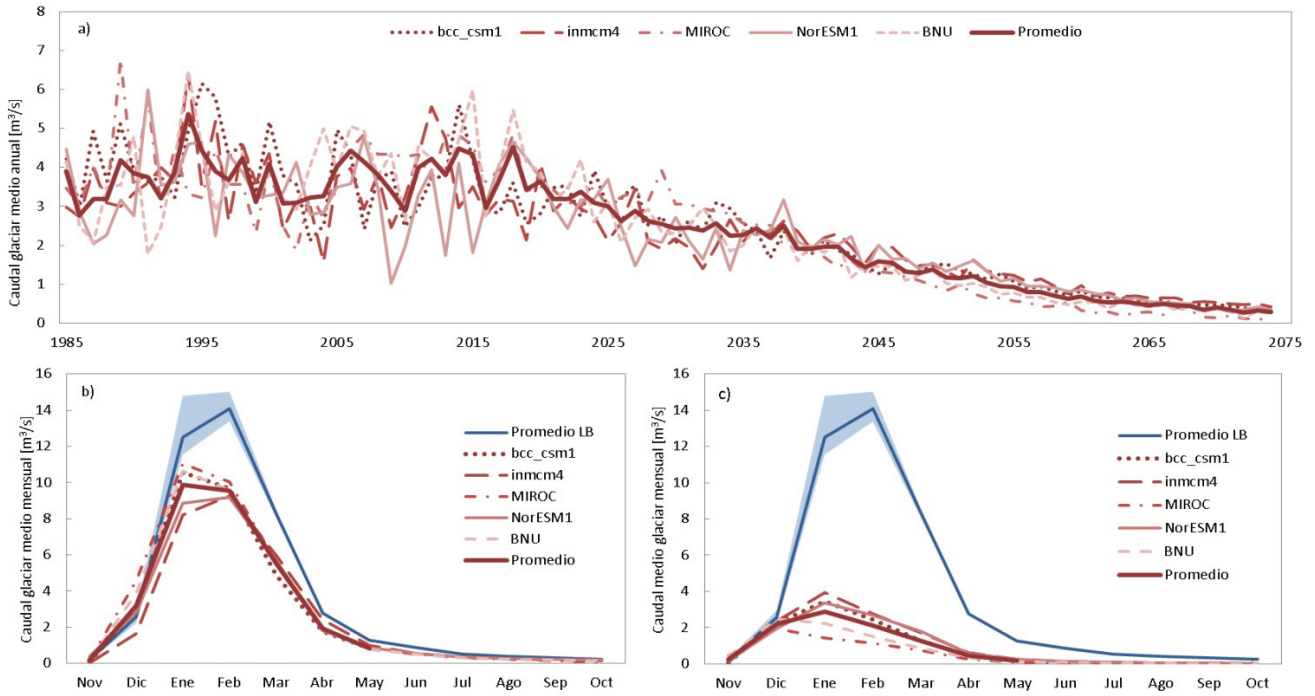


Figura 48. (a) Proyección caudal glaciar anual; (b) curva de variación estacional del caudal glaciar para el futuro cercano; y (c) curva de variación estacional del caudal glaciar para el futuro lejano en base al DHSVM (fuente: Cepeda, 2017).

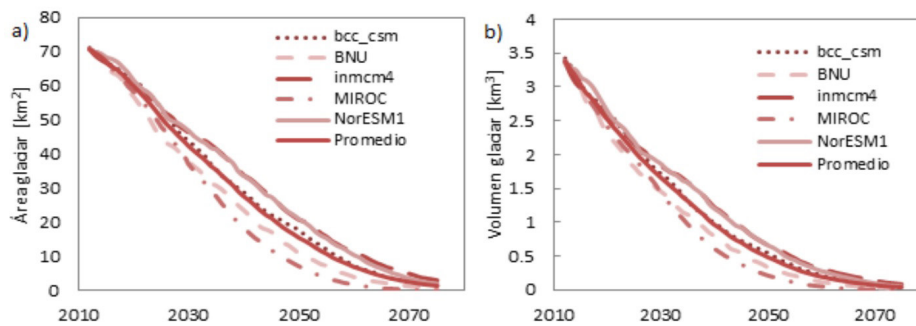


Figura 49. Proyección de (a) área y (b) volumen de los glaciares en la cuenca del río Olivares bajo el escenario RCP 8.5 para el modelo DHSVM (fuente: Cepeda, 2017).

6.

CONCLUSIONES



GLACIARES DE LA CORDILLERA DE LOS ANDES.
IMPACTOS DE LA INDUSTRIA MINERA

// 2023

Los glaciares presentes en zonas montañosas juegan un rol fundamental en la regulación hídrica de las cuencas y son un factor importante en el abastecimiento humano en regiones con grandes densidades poblacionales y que frecuentemente se ven enfrentadas a períodos de escasez hídrica. A nivel mundial, se estima que 140 millones de personas viven en zonas en las que el agua de deshielo glaciar aporta, con carácter estacional, al menos el 25% de la escorrentía. Lamentablemente, debido al calentamiento atmosférico global, la mayoría de los glaciares de la Tierra retrocedieron durante el siglo XX y continúan haciéndolo, por lo que se espera que el aporte de agua de deshielo glaciar a la escorrentía disminuya paulatinamente en las próximas décadas.

Sin perjuicio de lo anterior, la evidencia reciente muestra que además del cambio climático existen factores antrópicos que explican gran parte del retroceso glaciar en zonas específicas. Por ejemplo, en Chile, la disminución del albedo por depositación de material particulado proveniente de faenas mineras explica hasta un 82% del retroceso del glaciar Olivares Alfa, en la cuenca del río Olivares. El material particulado presente en los glaciares de la cuenca del río Olivares tiene su origen principalmente en los relaves de las faenas mineras ubicadas en las cuencas adyacentes, a saber, División Andina (Codelco) y Los Bronces (Anglo American).

Recientemente, fue aprobada la ampliación del proyecto Los Bronces (Los Bronces Integrado) que considera una ampliación del rajo principal y la construcción de una etapa subterránea en la cabecera de la cuenca del estero Yerba Loca. La evaluación ambiental del proyecto solo consideró a los glaciares rocosos Infiernillo y Observatorio, y al glaciar cubierto Altar Sur. Sin embargo, la evidencia reciente muestra que el área de influencia de la pluma de dispersión de material particulado se extiende, al menos, hasta los glaciares Olivares Alfa y Paloma Norte, mientras que el área de influencia asociada a vibraciones por tronaduras debería extenderse a todos los glaciares de la cuenca del estero Yerba Loca.



BIBLIOGRAFÍA



GLACIARES DE LA CORDILLERA DE LOS ANDES.
IMPACTOS DE LA INDUSTRIA MINERA

// 2023

- Aniya, M. 1995. Holocene glacial chronology in Patagonia: Tyndall and Upsala glaciers. *Arctic and Alpine Research*, 27(4), 311-322.
- Arellano Ubello, I. A. 2021. Análisis de la expansión minera y sus efectos entre los años 1970-2019 en el Valle del Aconcagua.
- Arenson, L. U., Jakob, M., & Wainstein, P. 2015. Effects of dust deposition on glacier ablation and runoff at the Pascua-Lama Mining Project, Chile and Argentina. In *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 1: Climate Change and Engineering Geology* (pp. 27-32). Springer International Publishing.
- Arenson, L.; Hoelzle, M. & Springman, S. 2002. Borehole deformation measurements and internal structure of some rock glaciers in Switzerland. *Permafrost and Periglacial Processes*, Nº 13, p. 117-135.
- Ayala, A., Farías-barahona, D., Huss, M., Pellicciotti, F., McPhee, J., 2020. Glacier runoff variations since 1955 in the Maipo river basin, in the semiarid Andes of central Chile. *Cryosphere* 14, 2005–2027.
- Ayala, A., Pellicciotti, F., MacDonell, S., McPhee, J., Vivero, S., Campos, C., Egli, P., 2016. Modelling the hydrological response of debris-free and debris-covered glaciers to present climatic conditions in the semiarid Andes of central Chile. *Hydrol. Process.* 30, 4036–4058.
- Azócar Sandoval, G. F., & Brenning, A. 2008. Intervenciones de glaciares rocosos en minera Los Pelambres, región de Coquimbo, Chile: informe técnico= Interventions in rock glaciers in the Pelambres mine, Coquimbo region, Chile: technical report.
- Azócar, G. F. & Brenning, A. 2010. Hydrological and geomorphological significance of rock glaciers in the dry Andes, Chile (27°-33°S). *Permafrost and Periglacial Processes*, Nº 21, p. 42-53.
- Baraer, M., Mark, B. G., McKENZIE, J. M., Condom, T., Bury, J., Huh, K. I., ... & Rathay, S. 2012. Glacier recession and water resources in Peru's Cordillera Blanca. *Journal of Glaciology*, 58(207), 134-150.
- Barandun, M., Bravo, C., Grobety, B., Jenk, T., Fang, L., Naegeli, K., ... & Schwikowski, M. 2022. Anthropogenic influence on surface changes at the Olivares glaciers; Central Chile. *Science of the Total Environment*, 833, 155068.
- Barcaza, G., Nussbaumer, S. U., Tapia, G., Valdés, J., García, J. L., Videla, Y., ... & Arias, V. 2017. Glacier inventory and recent glacier variations in the Andes of Chile, South America. *Annals of Glaciology*, 58(75pt2), 166-180.
- Barsch, D. 1996. *Rockglaciers*. Berlin: Springer.
- Bellisario, A., Ferrando, F., & Janke, J. 2013. Water resources in Chile: The critical relation between glaciers and mining for sustainable water management. *Investigaciones Geográficas*, 46, 3-24.
- Bliss, A., Hock, R., & Radić, V. 2014. Global response of glacier runoff to twenty-first century climate change. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 119(4), 717-730.
- Bond, T.C., Doherty, S.J., Fahey, D.W., Forster, P.M., Berntsen, T., De Angelo, B.J., Flanner, M.G., Ghan, S., Karcher, B., Koch, D., Kinne, S., Kondo, Y., Quiinn, P.K., Sarofim, M.C., Schultz, M.G., Schulz, M., Venkataraman, C., Zhang, H., Zhang, S., Bellouin, N., Guttikunda, S.K., Hopke, P.K., Jacobson, M.Z., Kaiser, J.W., Klimont, Z., Lohmann, U., Schwarz, J.P., Shindell, D., Storelvmo, T., Warren, S.G., Zender, C.S. 2013.
- Bond, T.C., Doherty, S.J., Fahey, D.W., Forster, P.M., Berntsen, T., De Angelo, B.J., Flanner, M.G., Ghan, S., Karcher, B., Koch, D., Kinne, S., Kondo, Y., Quiinn, P.K., Sarofim, M.C., Schultz, M.G., Schulz, M., Venkataraman, C., Zhang, H., Zhang, S., Bellouin, N., Guttikunda, S.K., Hopke, P.K., Jacobson, M.Z., Kaiser, J.W., Klimont, Z., Lohmann, U., Schwarz, J.P., Shindell, D., Storelvmo, T., Warren, S.G., Zender, C.S. 2013. Bounding the role of black carbon in the climate system: a scientific assessment. *J. Geophys. Res. Atmos.* 118 (11), 5380–5552.
- Brenning, A. 2005. Geomorphological, hydrological and climatic significance of rock glaciers in the Andes of Central Chile (33–35°S). *Permafrost and Periglacial Processes*, Nº 16, p. 231-240.
- Bruce, I.; Redmond, D.; Thalenhorst, H. 2008. Technical report on the 2007 year-end mineral reserves and resources Kumtor gold mine. Toronto, Strathcona Mineral Services Limited.
- Burger, K. C., Degenhardt Jr, J. J., & Giardino, J. R. 1999. Engineering geomorphology of rock glaciers. *Geomorphology*, 31(1-4), 93-132.

- Casassa, G., Brecher, H., Rivera, A., & Aniya, M. 1997. A century-long recession record of Glaciar O'Higgins, Chilean Patagonia. *Annals of Glaciology*, 24, 106-110.
- Castillo, Y. 2015. Caracterización de la hidrología glaciar de la cuenca del río Maipo mediante la implementación de un modelo glacioclimatológico semi-distribuido físicamente basado. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico.
- CECs, 2016. Balance de Masa Glaciar. Ediciones CECs.
- Cepeda Abad, J. A. 2017. Análisis de los caudales nivo-glaciares históricos y proyectados en la cuenca del Río Olivares: comparación entre el modelo DHSVM y WEAP.
- Cereceda, F. CETAM-UTFSM, 2014. Caracterización glacioquímica de elementos traza en muestras de nieve.
- Cereceda-Balic, F., Ruggeri, M. F., Vidal, V., Ruiz, L., & Fu, J. S. 2022. Understanding the role of anthropogenic emissions in glaciers retreat in the central Andes of Chile. *Environmental Research*, 214, 113756.
- CODELCO. 2008. Memoria Anual Codelco 2007. Santiago: Codelco.
- Colgan, W., & Arenson, L. U. 2013. Open-pit glacier ice excavation: Brief review. *Journal of Cold Regions Engineering*, 27(4), 223-243.
- Conama. 2009. Política de Protección y Conservación de Glaciares.
- Contreras, A. e Illanes, J. L. 1992. Depósito de lastre glaciar Infiernillo Sur, mina Los Bronces. En: Santiago, Minería en altura, 43a Convención del Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, La Serena.
- DGA. 2009. Estrategia Nacional de Glaciares.
- DGA. 2011. Variaciones recientes de glaciares en Chile, según principales zonas glaciológicas. SIT N°261.
- DGA. 2015. Modelación del balance de masa y descarga de agua en glaciares del Norte Chico y Chile Central. SIT N°382.
- Doherty, S.J., Grenfell, T.C., Forsström, S., Hegg, D.L., Brandt, R.E., Warren, S.G. 2013. Observed vertical redistribution of black carbon and other insoluble light-absorbing particles in melting snow. *J. Geophys. Res.-Atmos.* 118, 1-17.
- Dussailant, I., Berthier, E., Brun, F., Masiokas, M., Hugonnet, R., Favier, V., ... & Ruiz, L. 2019. Two decades of glacier mass loss along the Andes. *Nature Geoscience*, 12(10), 802-808.
- EDITEC. 2006. Compendio de la minería chilena. Santiago: Editec.
- Evans, D. J., Ewertowski, M., Jamieson, S. S., & Orton, C. 2016. Surficial geology and geomorphology of the Kumtor Gold Mine, Kyrgyzstan: human impacts on mountain glacier landsystems. *Journal of Maps*, 12(5), 757-769.
- Falvey, M., & Garreaud, R. D. 2009. Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979-2006). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D4).
- Farías-Barahona, D., Ayala, Á., Bravo, C., Vivero, S., Seehaus, T., Vijay, S., ... & Braun, M. H. 2020. 60 years of glacier elevation and mass changes in the Maipo River Basin, central Andes of Chile. *Remote Sensing*, 12(10), 1658.
- Farías-Barahona, D., Vivero, S., Casassa, G., Schaefer, M., Burger, F., Seehaus, T., ... & Braun, M. H. 2019. Geodetic mass balances and area changes of Echaurren Norte Glacier (Central Andes, Chile) between 1955 and 2015. *Remote Sensing*, 11(3), 260.
- Fountain, A. G., & Tangborn, W. V. 1985. The effect of glaciers on streamflow variations. *Water Resources Research*, 21(4), 579-586.
- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Veloso-Aguila, D. 2020. The central Chile mega drought (2010-2018): a climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421-439.

- GEOESTUDIOS. 1998. Estudio de glaciares de roca en el área de mina Los Pelambres. Informe técnico # 376 para Bechtel Chile Ltda. Santiago: Geoestudios Ltda.
- Gleick, P. H., & Palaniappan, M. 2010. Peak water limits to freshwater withdrawal and use. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(25), 11155-11162.
- GOLDER ASSOCIATES. 2006. Estudio de impacto ambiental Modificaciones proyecto Pascua-Lama. Santiago: Golder Associates.
- Grebenets, V. I., Kerimov, A. O., & Bakcheev, D. S. 1997. Dangerous movements of technogenic rock glaciers, Norilsk, Russia. In *Engineering geology and the environment* (pp. 689-692).
- Hansen, J., Nazarenko, L. 2004. Soot climate forcing via snow and ice albedos. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 101(2), 423-428.
- Huss, M., & Hock, R. 2018. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nature Climate Change*, 8(2), 135-140.
- Huss, M., & Hock, R. 2018. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nature Climate Change*, 8(2), 135-140.
- Huss, M., Bookhagen, B., Huggel, C., Jacobsen, D., Bradley, R. S., Clague, J. J., ... & Winder, M. 2017. Toward mountains without permanent snow and ice. *Earth's Future*, 5(5), 418-435.
- Jansson, P., Hock, R., & Schneider, T. 2003. The concept of glacier storage: a review. *Journal of Hydrology*, 282(1-4), 116-129.
- Kääb, A., Frauenfelder, R., & Roer, I. 2007. On the response of rockglacier creep to surface temperature increase. *Global and Planetary Change*, 56(1-2), 172-187.
- Kääb, A., Huggel, C., Fischer, L., Guex, S., Paul, F., Roer, I., ... & Weidmann, Y. 2005. Remote sensing of glacier-and permafrost-related hazards in high mountains: an overview. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5(4), 527-554.
- Kaspari, S., Painter, T.H., Gysel, M., Skiles, S.M., Schwikowski, M. 2014. Seasonal and elevational variations of black carbon and dust in snow and ice in the Solu-Khumbu, Nepal and estimated radiative forcing. *Atmos. Chem. Phys.* 14, 8089-8103.
- Kronenberg, J. 2009. Global warming, glaciers and gold mining. In: Ljubljana, Transformation, Innovation and Adaptation for Sustainability, 8th International Conference of the European Society for Ecological Economics.
- LA NACIÓN. 2008. Los Pelambres en la mira por glaciares rocosos. *Diario La Nación*. Publicación periódica de Santiago, Chile, 16 de octubre de 2008.
- Lapere, R., Menut, L., Mailler, S., & Huneus, N. 2021. Seasonal variation in atmospheric pollutants transport in central Chile: dynamics and consequences. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(8), 6431-6454.
- Le Quesne, C., Acuña, C., Boninsegna, J. A., Rivera, A., & Barichivich, J. 2009. Long-term glacier variations in the Central Andes of Argentina and Chile, inferred from historical records and tree-ring reconstructed precipitation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3-4), 334-344.
- Mahowald, N. M. et al. 2010. Observed 20th century desert dust variability: impact on climate and biogeochemistry. *Atmos. Chem. Phys.* 10, 10875-10893.
- Malmros, J.K.; Mernild, S.H.; Wilson, R.; Fensholt, R.; Yde, J.C. 2016. Glacier area changes in the central Chilean and Argentinean Andes 1955-2013/2014. *J. Glaciol.* 62, 391-401.
- Marzeion, B., Cogley, J. G., Richter, K., & Parkes, D. 2014. Attribution of global glacier mass loss to anthropogenic and natural causes. *Science*, 345(6199), 919-921.
- Mattson, L. E., J. S. Gardner, and G. J. Young. 1993. Ablation on debris covered glaciers: An example from the Rakhiot Glacier, Punjab, Himalaya, in *Snow and Glacier Hydrology*, edited by G. J. Young, IAHS Publ., 218, 289-296.

- Meier, M. F., & Tangborn, W. V. 1961. Distinctive characteristics of glacier runoff. US Geological Survey Professional Paper, 424, 14-16.
- MINERÍA. 2006a. Con la colaboración de las mineras, el Senado busca proteger y valorar los glaciares. *Minería*, N° 68, p. 38-39.
- MINERÍA. 2006b. Minera Los Pelambres. *Minería*. N° 66, p. 8-18.
- Morales-Carvajal, R. F. 2001. Manejo de morrenas en mina Sur-Sur. Memoria título profesional ingeniero en minas. Santiago: Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad de Chile, Chile.
- Nicholson, L. y Marín, J. 2008. Inventario de los cuerpos de hielo y glaciares rocosos en la cuenca superior del río Huasco. Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA). Informe N° 2008-10. La Serena: Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas.
- Pereira, S. F. R., & Veettil, B. K. 2019. Glacier decline in the Central Andes (33 S): Context and magnitude from satellite and historical data. *Journal of South American Earth Sciences*, 94, 102249.
- Pertziger, F. I. 1990. Role of glacier and snow cover melting in runoff variations from the small basins in Pamir and the Alps. In *Hydrology in Mountainous areas. I. Hydrological Measurements; The Water Cycle. Proceedings of the two Lausanne Symposia* (pp. 189-196).
- Rabatel, A., Castebrunet, H., Favier, V., Nicholson, L., & Kinnard, C. 2011. Glacier changes in the Pascua-Lama region, Chilean Andes (29 S): recent mass balance and 50 yr surface area variations. *The Cryosphere*, 5(4), 1029-1041.
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Cáceres, B., Ceballos, J. L., ... & Wagnon, P. 2013. Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*, 7(1), 81-102.
- Rivera, A., Koppes, M., Bravo, C., & Aravena, J. C. 2012. Little ice age advance and retreat of Glaciar Jorge Montt, Chilean Patagonia. *Climate of the Past*, 8(2), 403-414.
- Rivera, A.; Casassa, G.; Acuña, C.; Lange, H. 2000. Variaciones recientes de glaciares en Chile. *Investig. Geogr.* 34, 29-60.
- Sakakibara, D., & Sugiyama, S. 2014. Ice-front variations and speed changes of calving glaciers in the Southern Patagonia Icefield from 1984 to 2011. *Journal of Geophysical Research: earth surface*, 119(11), 2541-2554.
- Sarygulov, D.I. 2000. Gold of the Tien Shan Mountains (Bishkek).
- Schaner, N., Voisin, N., Nijssen, B., & Lettenmaier, D. P. 2012. The contribution of glacier melt to streamflow. *Environmental Research Letters*, 7(3), 034029.
- Schmale, J., Flanner, M., Kang, S., Sprenger, M., Zhang, Q., Guo, J., Li, Y., Schwikowski, M., Farinotti, D. 2017. Modulation of snow reflectance and snowmelt from Central Asian glaciers by anthropogenic black carbon. *Sci. Rep.* 7, 40501.
- Schmitt, C.G., Riggs, B.L., Horodyskyj, U.N., Khan, A.L., Ewing, H.A., All, J.D., Rodriguez, W.S. 2019. The measurement and impact of light absorbing particles on snow surface. *Cryosphere Discuss.*
- Schoolmeester, T., Johansen, K.S., Alfthan, B., Baker, E., Hesping, M. y Verbist, K. 2018. Atlas de Glaciares y Aguas Andinos. El impacto del retroceso de los glaciares sobre los recursos hídricos. UNESCO y GRID-Arendal.
- Segovia, A. 2014. Caracterización glaciológica de Chile y valoración de servicios ecosistémicos de glaciares en base a mercados reales (estudio de caso del Monumento Natural El Morado).
- Shaw, T.E., Ulloa, G., Fariñas-Barahona, D., Fernandez, R., Lattus, J.M., McPhee, J. 2020. Glacier albedo reduction and drought effects in the extratropical Andes, 1986-2020. *J. Glaciol.* 67 (261), 158-169.
- Skiles, S. M., Flanner, M., Cook, J. M., Dumont, M., & Painter, T. H. 2018. Radiative forcing by light-absorbing particles in snow. *Nature Climate Change*, 8(11), 964-971.

- Skiles, S.M., Painter, T.H. 2018. Assessment of radiative forcing by light absorbing particles in snow from in situ observations with radiative transfer modeling. *J. Hydrometeorol.* 19 (8), 1397–1409.
- Skvarca, P., Raup, B., & De Angelis, H. 2003. Recent behaviour of Glaciar Upsala, a fast-flowing calving glacier in Lago Argentino, southern Patagonia. *Annals of Glaciology*, 36, 184-188.
- Stenborg, T. 1970. Delay of run-off from a glacier basin. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 52(1), 1-30.
- Sterle, K.M., McConnell, J.R., Dozier, J., Edwards, R., Flanner, M. 2013. Retention and radiative forcing of black carbon in the Eastern Sierra Nevada snow. *Cryosphere* 7, 365–374.
- Terram. 2022. Minuta: Los impactos sobre glaciares del proyecto Los Bronces Integrado que Anglo American excluyó de su área de influencia.
- Torgoev, I.A. and Y.G. Aleshin 2001, *Ekologia gornopromyshlennovo kompleksa Kyrgyzstana (Ecology of the mining complex of Kyrgyzstan)*, Bishkek: Ilim (in Russian).
- Trombotto, D.; Buk, E. & Hernández, J. 1999. Rock glaciers in the Southern Central Andes (approx. 33°-34°S), Cordillera Frontal, Mendoza, Argentina. *Bamberger Geographische Schriften*, N° 19, p. 145-173.
- Trombotto, D.; Buk, E. & Hernández, J. 1999. Rock glaciers in the Southern Central Andes (approx. 33°-34°S), Cordillera Frontal, Mendoza, Argentina. *Bamberger Geographische Schriften*, N° 19, p. 145-173.
- Valenzuela, L. 2004. Stability issues in natural and man made slopes in mining. In: LACERDA, W. A.; EHRlich, M.; FONTOURA, S. A. B. & SAYÃO, A. S. F. *Landslides: evaluation and stabilization*. Leiden: Balkema, 2004, p. 467-473.
- Vuille, M., B. Francou, P. Wagnon, I. Juen, G. Kaser, B. G. Mark y R. S. Bradley. 2008a. Climate change and tropical Andean glaciers—Past, present and future. *Earth Science Reviews* 89: 79–96.
- Vuille, M., Carey, M., Huggel, C., Buytaert, W., Rabatel, A., Jacobsen, D., ... & Sicart, J. E. 2018. Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes—Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth-science reviews*, 176, 195-213.
- Vuille, M., Franquist, E., Garreaud, R., Lavado Casimiro, W. S., & Cáceres, B. 2015. Impact of the global warming hiatus on Andean temperature. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(9), 3745-3757.
- Vuille, M., G. Kaser y I. Juen. 2008b. Glacier mass balance variability in the Cordillera Blanca, Peru and its relationship with climate and the large-scale circulation. *Global and Planetary Change* 62(1–2): 14–28.
- Warren, C. R., & Sugden, D. E. 1993. The Patagonian icefields: a glaciological review. *Arctic and Alpine Research*, 25(4), 316-331.
- Zalazar, L., Ferri, L., Castro, M., Gargantini, H., Gimenez, M., Pitte, P., ... & Villalba, R. 2020. Spatial distribution and characteristics of Andean ice masses in Argentina: results from the first National Glacier Inventory. *Journal of Glaciology*, 66(260), 938-949.
- Zemp, M., Frey, H., Gärtner-Roer, I., Nussbaumer, S. U., Hoelzle, M., Paul, F., ... & Vincent, C. 2015. Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century. *Journal of glaciology*, 61(228), 745-762.
- Zemp, M., Huss, M., Thibert, E., Eckert, N., McNabb, R., Huber, J., ... & Cogley, J. G. 2019. Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016. *Nature*, 568(7752), 382-386.

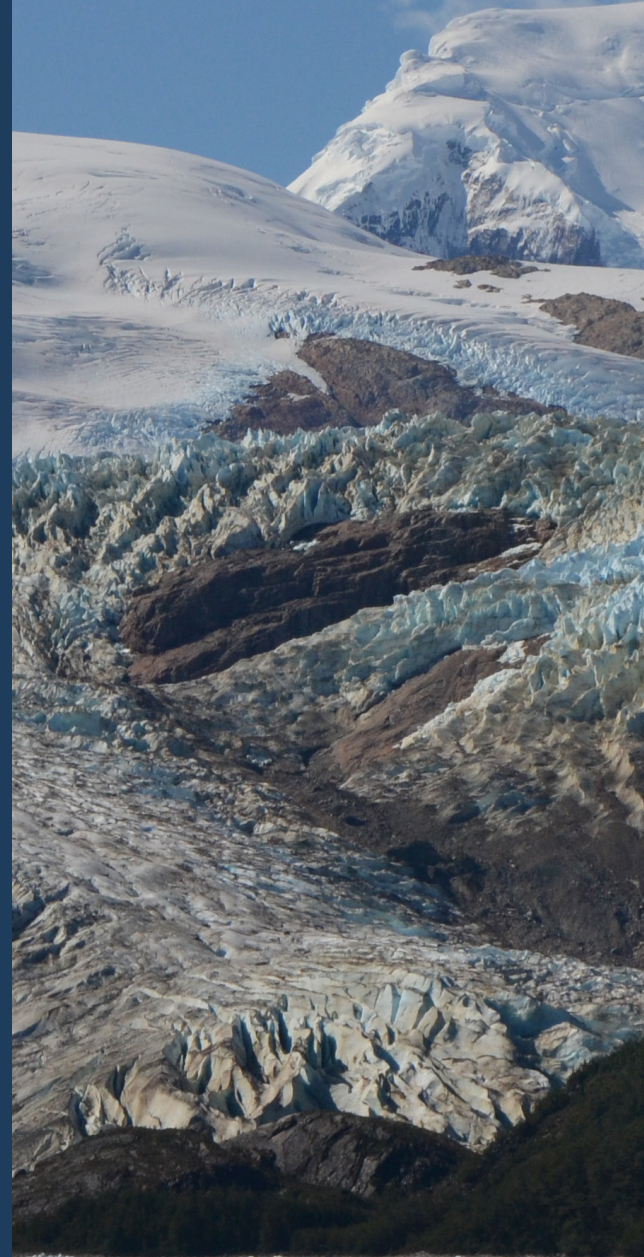
Glaci

GLACIARES DE LA CORDILLERA DE LOS ANDES:

Impactos de la industria minera



// DICIEMBRE 2023



GREENPEACE