



Antecedentes científicos para la incorporación de la medición de polvo en glaciares en el SEA: minería y seguridad hídrica de Santiago

Scientific basis for incorporating glacier dust measurement into Chile's Environmental Evaluation System: Mining and water security in Santiago

Historial del Artículo

Recibido:

9 de mayo de 2025

Revisado:

11 de julio de 2025

Aceptado:

25 de julio de 2025

Alexis Caro , Universidad de Playa Ancha, Chile

Silvana Espinosa, Greenpeace Chile, Chile

Carolina Concha, Universidad del Desarrollo, Chile

Alexis Segovia , Universidad de Chile, Chile

*Contacto: alexis.caro.paredes@gmail.com

Palabras clave

Albedo glaciar, monitoreo
glaciar, polvo sobre glaciares,
protección de glaciares, SEA

RESUMEN

La cuenca del río Maipo que alberga a la ciudad de Santiago es la que posee la mayor superficie englacizada de la zona norte y centro de Chile. Estos glaciares que abastecen de agua a Santiago, y que, en años muy secos, pueden contribuir hasta el 100% del caudal de verano del río Maipo, son afectados por el polvo proveniente de la minería y la ciudad. El polvo acelera el derretimiento de los glaciares. Sin embargo, el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) no ha incorporado la identificación del impacto del polvo en glaciares en la normativa, dejándolo a “buena voluntad de la industria minera”. Anglo American declaró que la minería no afectó a los glaciares durante la evaluación ambiental del proyecto Los Bronces Integrado. Esta expansión será parte del cuarto distrito minero más importante del mundo hacia 2050. La evaluación ambiental no incluyó mediciones in situ de polvo en glaciares ni su efecto. Proponemos, mediante la revisión del estado actual de los glaciares de las cuencas Mapocho y Olivares, del efecto del polvo en glaciares y de la aprobación política del proyecto Los Bronces Integrado, actualizar la guía “Contenidos Técnicos para la Evaluación Ambiental del Recurso Hídrico” del SEA. Esta debe incorporar el efecto del polvo en los glaciares mediante mediciones in situ, análisis satelital y simulación numérica. Nuestra propuesta permitirá identificar el impacto minero indirecto en glaciares, contribuyendo a preservar estas reservas de agua futura.

Keywords

Glacier albedo, glacier
monitoring, dust on glaciers,
glacier protection, SEA

ABSTRACT

The Maipo River basin, close to the city of Santiago, contains the largest glacierized area in northern and central Chile. These glaciers, which supply water to Santiago city, and which can contribute up to 100% of the Maipo River's summer flow in very dry years, are affected by dust from mining and the city. The dust accelerates the glacier melting. However, the Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) has not incorporated the identification of the impact of dust on glaciers into the regulations, leaving it to “the good will of the mining industry”. Anglo American stated that mining did not affect glaciers during the environmental assessment of the Los Bronces Integrado project. This project is an expansion that seeks to contribute to the fourth most important mining district in the world by 2050. The environmental assessment did not include in situ measurements of dust on glaciers or their effect. We propose, through the review of the current state of the glaciers in the Mapocho and Olivares basins, of the effect of dust on glaciers, and the political approval of the Los Bronces Integrado project, to update the SEA's guide called “Contenidos Técnicos para la Evaluación Ambiental de los Recursos Hídricos”. This should incorporate the effect of dust on glaciers through in situ measurements, satellite analysis, and numerical simulation. Our proposal will allow the identification of the indirect impact of mining on glaciers, which will contribute to preserving these future water reserves.

Introducción

Los glaciares de la cuenca del río Maipo pueden aportar hasta el 100% del caudal de verano de años muy secos, siendo una fuente crítica de agua para la ciudad de Santiago (Ayala et al., 2020; Peña & Nazarala, 1987). En la zona central de Chile, los glaciares han reducido su tamaño desde 1955 (Malmros et al., 2016; Marangunic et al., 2021), experimentando una aceleración en la pérdida de masa desde el inicio de la megasequía en 2010 (Dussaillant et al., 2019; Garreaud et al., 2017). Esta reducción de los glaciares ha gatillado un aumento en su contribución hídrica en muchas cuencas, situación que se revertirá durante las próximas décadas (Caro et al., 2024, 2025), lo que pone en riesgo el suministro de agua a la ciudad de Santiago.

En este contexto, los glaciares en las cuencas Mapocho y Olivares, que forman parte de la red hídrica del río Maipo, están particularmente expuestos a la deposición de polvo proveniente tanto de la actividad minera como de la ciudad de Santiago (Barandun et al., 2022; DGA, 2014; Lapere et al., 2023). La deposición de polvo en los glaciares de la cuenca Olivares podría haber contribuido a que esta haya mostrado la mayor tasa de pérdida de masa glaciar de la cuenca del Maipo entre 2000 y 2013, con una tasa de $-0,32 \pm 0,13$ m eq. a año $^{-1}$ (Barandun et al., 2022; Farías-Barahona et al., 2020).

El polvo hace referencia a las partículas absorbentes de radiación (en inglés *light absorbing particles*, LAPs) que son depositadas en la superficie de nieve y hielo, pudiendo ser partículas carbonosas (carbono negro y carbono orgánico) y de polvo mineral (con tamaño de la partícula sobre 2.5 μm) (Caponi et al., 2017; Gilardoni et al., 2022). Este material particulado posiblemente sedimentable (MPS) será tratado como polvo en este estudio. El polvo disminuye el albedo de los glaciares, incrementando la absorción de energía solar y acelerando el derretimiento de nieve y hielo (Gilardoni et al., 2022), lo que podría aumentar temporalmente la descarga hídrica glaciar en los ríos. La dispersión del polvo depende de factores como la velocidad del viento y estabilidad atmosférica, presentando un mayor desplazamiento del polvo en zonas con alta velocidad del viento y baja estabilidad (Boubel, 1994). Se ha estimado que vientos superiores a 10 km/h pueden desplazar partículas de polvo mayores a 10 μm decenas de kilómetros (Boubel, 1994; Cichowicz et al., 2020).

A pesar de los posibles efectos adversos del polvo en la superficie glaciar, en Chile no existen lineamientos técnicos o normativas que regulen su medición en glaciares, ni su impacto en la tasa de derretimiento glaciar. Esto es aún más

preocupante, considerando que desde el 2012 la Dirección General de Aguas (DGA) ha advertido sobre el potencial impacto del polvo en glaciares, lamentablemente sin hacerse cargo hasta ahora (DGA, 2012, 2014; SEA, 2022a). A esto se suma la experiencia técnica del SEA que debió ser incorporada desde 2001 a través de la evaluación ambiental del proyecto minero Pascua Lama, el cual inicialmente no consideró el efecto del polvo en glaciares, e incluso llegó a permitir su destrucción y traslado (EIA, 2001). La ejecución de dicho proyecto generó una conciencia ciudadana y esfuerzos políticos orientados a proteger los glaciares (Herrera & Segovia, 2019).

Desde el Estado, la DGA y el SEA tienen roles clave en la protección de los recursos hídricos y glaciares, particularmente durante la evaluación ambiental de proyectos mineros (DGA, 2024; SEA, 2024). A pesar de que la DGA reconoce la importancia de los glaciares como fuentes primarias de agua para el río Maipo, no ha estimado su contribución hídrica ni ha planificado estudios sobre el polvo en glaciares cercanos a proyectos mineros y a la ciudad de Santiago (DGA, 2015a, 2015b, 2018). Adicionalmente, aunque el SEA considera a los glaciares como un recurso hídrico crucial y reconoce la necesidad de su monitoreo, no exige la medición de la pérdida de masa superficial ni de todas las variables que lo originan, entre ellas el polvo (SEA, 2022). Esto, considerando que la medición de pérdida y ganancia de masa anual en glaciares, conocido como balance de masa, es esencial para entender su dinámica y contribución hídrica a los ríos (Cuffey & Paterson, 2010).

La incorporación de mediciones del impacto del polvo en la pérdida de masa glaciar en la normativa chilena es particularmente relevante dado que el proyecto minero Los Bronces Integrado, aprobado políticamente en 2023 tras un rechazo técnico inicial en 2022, no las incluyó en el monitoreo de los glaciares de la cuenca Mapocho (RCA, 2022; RCM, 2023). La aprobación del proyecto ignoró las recomendaciones de la DGA en 2014 y en la Adenda sobre la contaminación minera en los glaciares y sobre la necesidad de realizar mediciones in-situ para descartar el impacto del polvo en sus superficies (DGA, 2014; RCA, 2022; RCM, 2023). A ello se suma la ambiciosa colaboración entre Codelco y Anglo American, quienes buscan convertir esta zona en el cuarto distrito minero más importante a nivel global antes de 2050 (Codelco, 2025).

Este estudio tiene como objetivo sensibilizar a los tomadores de decisiones y a la sociedad chilena sobre la necesidad urgente de incorporar la medición de polvo y su efecto en el derretimiento glaciar como también el de definir umbrales de

depositación de polvo sobre glaciares cercanos a proyectos mineros. Estas mediciones deben ser incorporadas a la guía Contenidos Técnicos para la Evaluación Ambiental del Recurso Hídrico del SEA (2022b), estableciendo que las mineras y la DGA puedan evaluar de manera efectiva, a través de un umbral de polvo específico por glaciar basado en mediciones, el impacto del polvo en glaciares y en su escorrentía hacia los ríos en un contexto de cambio climático sin precedentes.

Tratamos brevemente los cambios recientes en los glaciares de las cuencas Mapocho y Olivares, analizamos los factores que controlan su balance de masa, y describimos los efectos del polvo depositado en su superficie. Luego se identifican las deficiencias en la metodología utilizada para estimar el impacto del polvo en glaciares por el proyecto Los Bronces Integrado. Finalmente, se proponen los aspectos clave que deben ser incorporados para proteger a los glaciares en la guía “Contenidos Técnicos para la Evaluación Ambiental del Recurso Hídrico” (SEA, 2022b), respecto al efecto del polvo en la superficie glaciar.

Área de estudio

La Figura 1 muestra los glaciares cercanos a los proyectos mineros, entre ellos el proyecto Los Bronces Integrado, que se encuentran al interior de las cuencas Mapocho y Olivares. Ambas cuencas alimentan de agua a la ciudad de Santiago. La cuenca Mapocho abarca a las subcuenca San Francisco, Estero Yerba Loca y Molina, y es definida en su elevación mínima por la estación fluviométrica Río Mapocho en Los Almendros (1024 m s.n.m.). Mientras que la cuenca Olivares es definida en la estación Río Olivares antes de Junta Río Colorado (1500 m s.n.m.).

Desde una perspectiva climática, las cuencas Mapocho y Olivares están ubicadas en los Andes centrales (31-36°S, Lliboutry, 1998), y se encuentran en la zona más fría y seca que caracteriza a las subcuenca septentrionales de la cuenca Maipo (Caro et al., 2021). A la elevación de los glaciares, la cuenca Mapocho presenta una precipitación total anual menor (400 mm/año) que la estimada en Olivares (450 mm/año) y temperaturas máximas promedio anuales más cálidas (2.4°C frente a 1°C) durante el período 1980-2019 (Caro et al., 2021). El clima está controlado por el anticiclón del Pacífico Sur (Rutllant & Fuenzalida, 1991), que inhibe las precipitaciones en verano y las permite en invierno por el paso de vientos del oeste (Garreaud et al., 2009). Sin embargo, los montos de precipitación se han reducido abruptamente desde el 2010, fecha de inicio de la megasequía (Garreaud et al., 2017). Adicionalmente, la temperatura del aire ha aumentado ~0,25 °C por década en

montaña entre 1975 y 2001 (Falvey & Garreaud, 2009). Específicamente, el glaciar Olivares Gamma mostró diferencias de temperatura sobre los 4°C comparando mediciones a 1 y 2 m desde la superficie en 2015 (Hanna et al., 2017).

Por otro lado, la variabilidad del viento ha sido menos estudiada. Regionalmente, el anticiclón del Pacífico Sur, junto con los Andes, condiciona los sistemas de vientos superficiales en el centro de Chile, provocando un flujo de vientos desde el suroeste hasta los Andes en verano (Lapere et al., 2021). La dirección del viento de verano coincide con la orientación de las cuencas Mapocho y Olivares, pero puede verse perturbada en invierno por el paso de frentes fríos (Lapere et al., 2023). Desde Argentina, los vientos del este son menos intensos (Lapere et al., 2021). Durante el verano, producto de la alta radiación solar y baja nubosidad, la circulación del viento local montaña-valle es muy activa (Lapere et al., 2023). En este contexto, los vientos sinópticos y locales de montaña-valle gobiernan el transporte de polvo en verano (Lapere et al., 2023). En la cuenca Mapocho se ha estimado que los vientos descendentes son más frecuentes alcanzando velocidades máximas de 65 km/h en el período 2015-2017 (según el Anexo de Clima y Meteorología). Adicionalmente, el Centro de Estudio Científicos de Valdivia (CECs, 2017) identificó que los vientos locales pueden pasar desde la zona alta de la subcuenca San Francisco, en donde se encuentra el proyecto Los Bronces Integrado, hacia la cuenca Olivares.

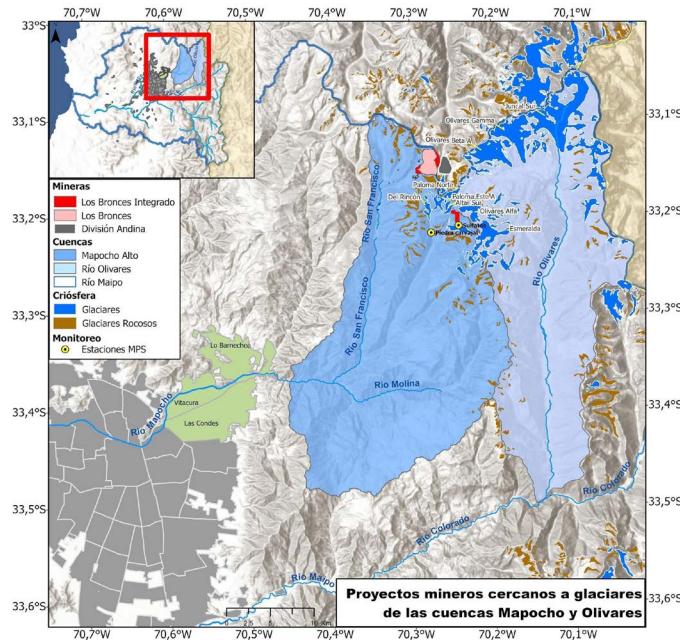
Materiales y métodos

Observaciones históricas recientes: desde mediciones de campo y sensores remotos

Mediciones de polvo

Estudios recientes han considerado el posible impacto de contaminantes atmosféricos emitidos por las actividades mineras en la pérdida de masa superficial de los glaciares Olivares Alfa y Bello en el período 2004-2014 (DGA, 2014). La cantidad de polvo fue medida a través de dispositivos instalados en la superficie de los glaciares Olivares Alfa y Bello durante unas semanas de septiembre y octubre de 2014. El tamaño del polvo fue identificado como PM1 a PM10 (Cereceda et al., 2022). Barandun et al. (2022) identificaron LAPs depositados en un mayor número de glaciares de la cuenca Olivares, mediante análisis de muestras químicas y mineralógicas en superficie y hielo. Adicionalmente, Anglo American realizó mediciones de polvo acumulado en el contexto del proyecto Los Bronces

Figura 1. Ubicación de glaciares y proyectos mineros activos en las cuencas Mapocho y Olivares. Estas cuencas son parte del sistema hídrico del río Maipo



Nota. La identificación de “glaciares” corresponde a aquellos que poseen distintas proporciones de superficies cubiertas por detritos rocosos, mientras que con “glaciares rocosos” se hace referencia a aquellos que poseen una gran cantidad de roca mezclada con hielo según el inventario de glaciares chilenos (DGA, 2022). En la ciudad de Santiago pueden identificarse las comunas suministradas con agua potable proveniente de las cuencas Mapocho (color verde) y río Maipo la cual incluye la cuenca Olivares (color gris) (JVRM, 2025).

Integrado (SEA, 2022a). El monitoreo fue llevado a cabo entre 2016 y 2018 en dos puntos al interior de la cuenca Mapocho (subcuenca Estero Yerba Loca), localizados a 2 km de distancia de la superficie glaciar descubierta de detritos rocosos más cercana. Las muestras de polvo consideraron entre 18 a 322 días de revista y fueron utilizadas para estimar tasas de polvo diarias. No hubo descripción metodológica de la recolección de las muestras de polvo. Adicionalmente, el SEA (2023) presentó nuevos datos de polvo medidos en la cuenca Olivares, sin embargo, no se mencionó la metodología y las fechas de muestreo.

Mediciones de balance de masa glaciar in-situ

En los glaciares del Mapocho y Olivares no existen mediciones in situ publicadas de cambios de masa superficial, entendidas estas como las realizadas a través del método glaciológico (Rivera et al., 2017). Sin embargo, existen mediciones de balance de masa derivadas de levantamientos Light Detection and Ranging (LiDAR) que serán descritas más adelante (Marangunic et al., 2021). Actualmente, el monitoreo de balance de masa de glaciares en ambas cuencas es liderado por Anglo American (Los Bronces, Mapocho) y Codelco (División Andina, Olivares). Adicionalmente,

la DGA realiza mediciones hidrometeorológicas en la cuenca Olivares, pero los datos no han sido publicados.

Contribución de los sensores remotos

Diversos productos provenientes de sensores remotos satelitales y de rango cercano han sido utilizados para conocer variables de la superficie glaciar en las cuencas de estudio. Algunas variables estudiadas son albedo, cambios de elevación de la superficie y área glaciar.

El albedo glaciar ha sido estimado utilizando imágenes Landsat. CECs (2017) estudió Chile central y Argentina abarcando las cuencas Olivares y Mapocho entre 2013-2017. En Mapocho, Marangunic et al. (2021) estimaron variaciones de albedo en la subcuenca Estero Yerba Loca entre 2000-2020. En Olivares, el albedo glaciar ha sido estudiado en un periodo más amplio entre 1986 y 2020 (Barandun et al., 2022; Peña & Olmedo, 2019; Shaw et al. 2021).

En mediciones de cambios de elevación de la superficie glaciar, destaca el estudio de Marangunic et al. (2021) en la subcuenca Estero Yerba Loca, quienes estimaron el balance de masa geodésico interanual de glaciares para

el periodo 2012-2020 utilizando levantamientos LiDAR. Fueron considerados glaciares con distintos porcentajes de superficies descubiertas de detritos rocosos, entre ellos los glaciares Paula, Paloma Este, Paloma Oeste, Del Rincón Alto, Altar Sur y Del Rincón. En Olivares, Hernández et al. (2017) estimaron cambios de elevación en los glaciares Olivares Alfa y Beta durante el periodo 2013-2016 utilizando también tecnología LiDAR. Otras investigaciones estudiaron los glaciares considerando un periodo más extenso, pero reduciendo la resolución espacial de su análisis, es decir, utilizaron productos de percepción remota de menor resolución. Cambios de elevación han sido desarrollados en los glaciares Olivares Alfa, Beta, Gamma y Juncal Sur entre 2015 y 2020 utilizando imágenes radar Sentinel 1 (Ibáñez & Ceballos, 2022). En la cuenca del Maipo, abarcando ambas cuencas de estudio, Farías-Barahona et al. (2020) analizaron la variación de la superficie glaciar entre 1955-2015 utilizando datos HYCON, TanDEM-X y LiDAR. Adicionalmente, la variación del área glaciar en Mapocho fue estudiada en el periodo 1955-2020 y en Olivares durante el periodo 1955-2014 (DGA, 2011, Malmros et al., 2016; Marangunic et al., 2021).

Simulaciones glaciológicas

Un número reducido de investigaciones se ha enfocado en estudiar los glaciares de las cuencas Mapocho y Olivares. En la cuenca Olivares se simuló el cambio de albedo glaciar y su efecto en el balance de masa, considerando cambios en la depositación de LAPs y nevadas (Barandun et al., 2022). Bravo et al. (2025) evaluaron el impacto de los ríos atmosféricos sobre los glaciares de la cuenca Olivares para el evento de enero de 2021. Fueron utilizadas imágenes satelitales, observaciones meteorológicas y un modelo de balance de masa glaciar para simular el glaciar Olivares Alfa. Mientras que Caro et al. (2021) estimaron la relevancia de la precipitación en el balance de masa glaciar a escala de la cuenca del Maipo, sumando la relevancia de variables morfométricas. Complementariamente, la contribución hídrica de los glaciares al río Olivares fue simulada por Ayala et al. (2020) para el periodo 1955-2016. Caro et al. (2024; 2025)模拟aron la dinámica y escorrentía glaciar en Mapocho y Olivares durante el siglo xxi.

Resultados

Cambios recientes de los glaciares en las cuencas Mapocho y Olivares

La cuenca del Maipo posee una extensión glaciar de 378 km², de los cuales la cuenca Mapocho alberga el 5%

(18.6 km²) y Olivares el 19% (72 km²) (Ayala et al., 2020; Farías-Barahona et al., 2020; Marangunic et al., 2021). Destaca el contenido potencial de hielo equivalente en agua que contiene la cuenca Olivares-Colorado, el cual ha sido estimado en 56% del total almacenado en la cuenca Maipo (Segovia & Casassa, 2025).

En Mapocho, solo 6 km² corresponden a glaciares con superficies limpias de detritos rocosos, concentrados principalmente en la subcuenca Estero Yerba Loca (4.4 km²). El retroceso de los glaciares desde 1955 se ha acelerado notablemente después de 2010 (Marangunic et al., 2021). En términos de balance de masa, los glaciares de la subcuenca Estero Yerba Loca mostraron un incremento del 77% en la tasa de balance de masa negativa, pasando de -0.04 a -0.17 m eq.a. a-1 entre los períodos 1955-2000 y 2000-2013 (Farías-Barahona et al., 2020).

En Olivares, cinco glaciares abarcan el 78% (56 km², año 2000) de la superficie glaciar total: Juncal Sur, Olivares Alfa, Olivares Gamma, Olivares Beta y Esmeralda (Malmros et al., 2016). Estos glaciares han mostrado una reducción de su superficie de por lo menos 21% (1955-2012), destacando una abrupta reducción de los glaciares Olivares Alfa (-63) y Olivares Beta (-34%) (Malmros et al., 2016). Otros estudios han estimado mayores pérdidas de superficie. DGA (2011) estimó pérdidas de área glaciar sobre el 20% en estos glaciares (1955-2011), estimando la mayor pérdida en el glaciar Juncal Sur (-34%). Ibáñez y Ceballos (2022) estimaron reducciones de área glaciar sobre el 37% en estos cinco glaciares (1955-2020), destacando Olivares Alfa (-89%) y Juncal Sur (-45%).

Respecto a pérdidas de masa superficial, Farías-Barahona et al. (2020) estimó que la cuenca Olivares presentó el balance de masa más negativo con -0.29 ± 0.07 m eq.a. a-1 de todas las subcuenca del Maipo (1955-2013). Al estimar un incremento de la tasa de balance de masa negativa del 13% (-0.28 a -0.32 m eq.a. a-1) entre 1955-2000 y 2000-2013. Adicionalmente, Hernández et al. (2017) estimaron una tasa anual de pérdida superficial de -1.64 ± 0.08 m a-1 en el glaciar Olivares Alfa y de -0.94 ± 0.10 m a-1 en el glaciar Olivares Beta. Se estima que esta pérdida de masa fue consecuencia del aumento de temperatura en altura y el déficit de precipitaciones entre 2013-2016.

Factores que controlan el balance de masa de los glaciares

En la cuenca del Maipo, Masiokas et al. (2016)模拟aron el balance de masa en el glaciar Echaurren Norte (1978-2013), estimando que la precipitación es el forzante dominante en la modulación del balance de masa anual.

A pesar de que el glaciar Echaurren Norte podría no ser un glaciar representativo de los glaciares descubiertos de la cuenca del Maipo, un estudio regional confirmó esta relación entre precipitación y balance de masa para el periodo 2000-2018 (Caro et al., 2020; Caro et al., 2021).

En Mapocho, el balance de masa negativo estimado en el período 2012-2020 puede ser explicado por un incremento de la temperatura, una reducción de las precipitaciones y una disminución del albedo superficial. Sin embargo, durante los años 2015-2017 este balance de masa negativo se vio interrumpido debido a la ocurrencia de precipitaciones relativamente mayores a las observadas (Marangunic et al., 2021).

En Olivares, se estimó que la pérdida de masa glaciar está altamente correlacionada con la reducción de la precipitación y el aumento de la temperatura (Caro et al., 2021). Adicionalmente, existe una relación directa entre derretimiento y reducción del albedo glaciar desde 1990 (Barandun et al., 2022; Peña & Olmedo, 2019). Barandun et al. (2022) observaron que durante el invierno (2014-2016 y 2018), los cambios de albedo fueron más acelerados en Paloma Norte y Olivares Alfa, mientras que en Juncal Sur y Olivares Beta el albedo fue casi constante. Además, encontraron que el momento en que se alcanza el albedo mínimo en toda la superficie glaciar durante el verano podría ser altamente relevante en la pérdida de masa. En donde la combinación de una reducción rápida de la nieve, su envejecimiento y la depositación de polvo provocan una retroalimentación que lleva a temporadas prolongadas de derretimiento del hielo glaciar. Esta reducción temprana del albedo en los glaciares Paloma Norte y Olivares Alfa sería el principal motivo de la pérdida de masa por encima del promedio de los glaciares de la cuenca durante las últimas dos décadas. Ambos glaciares también mostraron la mayor concentración de polvo en superficie (Barandun et al., 2022). Adicionalmente, ha sido observado que un evento de precipitación gatillado por un río atmosférico (enero 2021) genera una acumulación significativa de nieve sobre los glaciares de la cuenca Olivares, descendiendo la elevación de la isoterma de 0 °C (de 4000-4500 a 3250 m s.n.m.), lo cual contribuyó a contrarrestar la tendencia negativa de pérdida de masa del glaciar Olivares Alfa en 2021 (Bravo et al., 2025).

Efectos del polvo en la relación albedo y pérdida de masa glaciar

En los Alpes europeos se observó que una reducción del albedo de 0.3 a 0.15, debido a la existencia de polvo (2003-2006), provocó una pérdida de masa de hielo adicional de

3.5 m (Oerlemans et al., 2009). Esto es consistente con lo observado por Arenson et al. (2014), quienes compararon tasas de ablación en glaciares respecto a diferentes espesores de polvo. Entre los glaciares estudiados se encuentran Guanaco y Toro 1 al interior del proyecto minero Pascua Lama. Observaron que la mayor pérdida de masa superficial ocurre en capas de polvo de espesor inferiores a 1 mm, incrementando la ablación hasta un 400%, mientras que capas de polvo superiores a 50 mm generan una protección de la superficie glaciar (Arenson et al., 2014). Adicionalmente, ha sido observado que el polvo podría permitir el desarrollo de materia orgánica y cianobacterias, las que también contribuirían a reducir el albedo glaciar (Takeuchi & Li, 2008).

Es importante resaltar que a pesar de que el SEA (2022a, 2023) consideró que la acumulación de polvo en glaciares podría aumentar su tasa de derretimiento, no exigieron a Anglo American presentar mediciones de polvo en la superficie de los glaciares de la subcuenca Estero Yerba Loca, en el contexto de la evaluación del impacto ambiental del proyecto Los Bronces Integrado.

En Olivares, Barandun et al. (2022) observaron que los glaciares con mayor pérdida de masa presentan las mayores concentraciones de polvo superficial. La disminución acelerada del albedo de la nieve durante invierno y primavera, provocada por el polvo, podría ser responsable de la pérdida de masa de los glaciares Paloma Norte y Olivares Alfa, la cual es superior a la media observada en la cuenca. Estos glaciares se encuentran cerca de los ríos abiertos de la actividad minera. Las simulaciones (1990-2020) mostraron que una reducción del albedo en 0.01, en relación a la depositación de polvo en la superficie, provoca un aumento del derretimiento promedio de 16 mm eq. a. Los glaciares más sensibles al cambio de albedo fueron Paloma Norte (+22 mm eq. a) y Olivares Alfa (+17 mm eq. a) (Barandun et al., 2022). Adicionalmente, Cereceda et al. (2022) estimaron que las concentraciones medidas de cobre (Cu) y arsénico (As), la alta correlación entre carbón negro en el aire y el número de partículas finas, relacionados a la actividad minera, están influyendo significativamente en el balance de masa superficial del glaciar Olivares Alfa.

La Figura 2 muestra la respuesta de la superficie glaciar en dos escenarios: (A) en su estado natural y (B) intervenido por la depositación de polvo, respecto a la radiación solar incidente y reflejada. La Figura N°2A, representa los cambios de altura de la superficie glaciar durante las temporadas de acumulación (abril a septiembre) y pérdida (abril a marzo). Durante la temporada de pérdida la

energía solar absorbida es mayor en comparación con la temporada de acumulación, debido a la menor densidad de la superficie glaciar en este último período, cuando está mayormente cubierta por nieve. El balance entre la radiación solar reflejada e incidente definen el albedo glaciar (de 0 a 1). La Figura 2B muestra que la presencia de polvo sobre el glaciar reduce su albedo, aumentando la energía absorbida en ambas temporadas. Durante la temporada de pérdida, la mayor absorción de energía acelera la pérdida de masa glaciar en comparación con un escenario sin contaminación por polvo. El material depositado en los glaciares puede provenir desde distintos orígenes, incluyendo emisiones de grandes centros urbanos y la actividad minera (Barandun et al., 2022; Cereceda et al., 2022; Lapere et al., 2023). El polvo también puede provenir desde laderas adyacentes a glaciares producto de su transporte por viento, deslizamientos de nieve y/o desprendimientos de rocas.

Análisis del monitoreo de polvo en glaciares realizado para identificar el impacto del proyecto Los Bronces Integrado

Aquí son revisados los principales antecedentes del monitoreo de polvo en glaciares realizado por Anglo American para conocer la magnitud del impacto de la actividad minera y del proyecto Los Bronces Integrado en los glaciares de la subcuenca Estero Yerba Loca, cuenca Mapocho. No fue considerada la cuenca Olivares. Encontramos inconsistencias metodológicas relacionadas con (i) la representatividad de las muestras de polvo

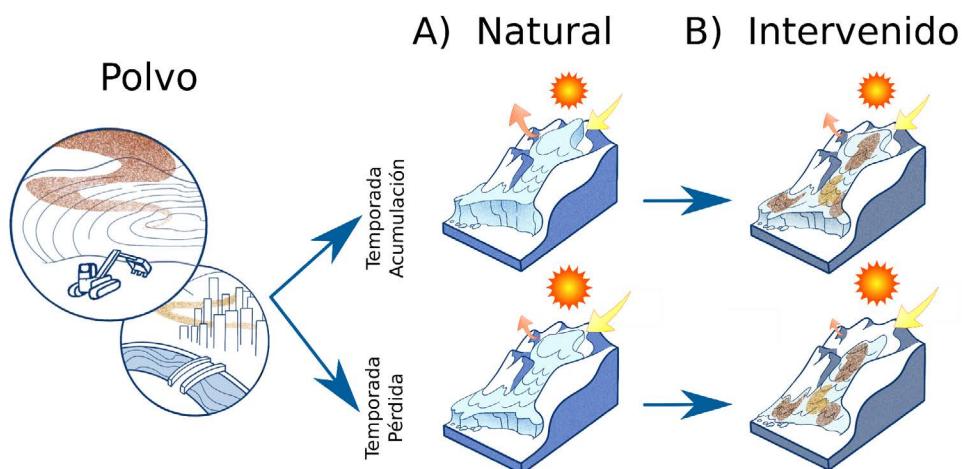
tomadas sólo fuera de los glaciares, y respecto a (ii) la extrapolación del umbral de impacto del polvo en el balance de masa glaciar sin validación en los glaciares. La Figura 3 muestra una nube de polvo sobre el rajo abierto del proyecto Los Bronces debido a tronaduras para un día de primavera.

Muestras de polvo tomadas fuera de las superficies glaciares

El monitoreo de los glaciares en la subcuenca Estero Yerba Loca solo incluyó al glaciar Altar Sur, que posee el 70% de su superficie cubierta por detritos de roca (Marangunic et al., 2021). Se caracterizó su balance de masa, dinámica y albedo, pero no se midió polvo en el glaciar y mucho menos la relación polvo y derretimiento. Los puntos de medición de polvo como Piedra Carvajal (3300 m s.n.m.) y Los Sulfatos (4200 m s.n.m.), se ubicaron a más de 2 km de distancia desde la superficie glaciar descubierta por detritos más cercana. Contexto en el cual, los vientos locales, con dirección norte a sur, transportarían una eventual nube de polvo pasando primero por las superficies glaciares y luego por uno de los puntos de monitoreo de polvo como es Piedra Carvajal.

La metodología para medir polvo no fue descrita en la Línea Base del proyecto (Glaciología y Calidad del Aire, SEA, 2025). Considerando resultados de otros proyectos mineros (por ej., Pascua Lama, Geoaire, 2015), es probable que se hayan usado contenedores de plástico instalados a ~2 m de la superficie para recoger las muestras de polvo. Este

Figura 2. Esquema conceptual del efecto del polvo en la pérdida de masa en glaciares



Nota. Es ejemplificado el efecto de la radiación solar en un glaciar en (A) estado natural durante las temporadas de acumulación (abril a septiembre) y de pérdida de masa (también temporada de ablación, octubre a marzo). (B) el glaciar en estado intervenido hace referencia a la presencia de polvo proveniente desde la minería y centros urbanos en su superficie. Las flechas hacen referencia a la radiación solar (color amarillo) y radiación reflejada (color naranjo), cuyos tamaños se asocian a la energía recibida y devuelta a la atmósfera.

método no es adecuado para medir polvo en superficies glaciares por sí sólo ya que la depositación de polvo no es homogénea en la superficie glaciar debido principalmente a las fuertes ráfagas de viento características de la zona (sobre 65 km/h registradas en estación meteorológica Los Sulfatos), capaces de remover el polvo y distribuirlo, así como también a la presencia de nieve en la boca del contenedor, capaz de interrumpir su recolección. La mecánica de transporte de polvo se verá afectada además por la interacción entre viento y otros factores ambientales (topografía, estabilidad atmosférica, temperatura, entre otros) y por las variaciones en la volatilidad de los componentes semivolátiles del polvo a diferentes temperaturas (Seinfeld & Pandis, 2016; Zardi & Whiteman, 2013), siendo fundamental considerar variaciones estacionales en el muestreo. Estas mediciones deben ser complementadas con experimentos de canchas de polvo en terreno, las que permiten conocer la relación espesor de polvo y tasa ablación (CECs, 2013).

El análisis de las mediciones de polvo tomadas sólo fuera de los glaciares (Calidad del aire, SEA, 2025), se basó en una tasa anual de concentración de polvo que consideró muestras tomadas en lapsos de tiempo muy diferentes. En Piedra Carvajal, la tasa de polvo anual fue de 42 mg/m²-día, con revisitas para recolectar las muestras entre 25 y 322 días. En Los Sulfatos, la tasa fue de 20 mg/m²-día, con revisitas entre 18 y 321 días. La revisita se refiere a la cantidad de días considerados desde que se instaló el frasco plástico hasta la fecha en que éste fue recogido. Sin embargo, la tasa de polvo estimada a partir de muestreos irregulares no permite identificar una tasa anual representativa de la acumulación de polvo, y mucho menos una tasa para cada temporada. Por ejemplo, el monitoreo de glaciares en proyecto Pascua-Lama recolectó muestras de polvo regularmente cada 30 días (Geoaire, 2015). Los resultados mostraron que en uno de los puntos de medición cercano al glaciar Guanaco, las tasas de polvo mensual variaron entre 17 y 653 mg/m²-día (2014-2015). Considerando todo el periodo de muestreo (210 días), la tasa de polvo anual hubiera sido de 201 mg/m²-día. Un segundo punto de monitoreo en el mismo glaciar hubiera presentado una tasa anual de 12 mg/m²-día. Estos resultados exponen la alta variabilidad que produce el número de días de muestreo en la estimación de la tasa de polvo anual, y que existe una gran diferencia en las concentraciones de polvo medidas en dos puntos cercanos.

A pesar de que uno de los objetivos del monitoreo de polvo en la actividad minera es rastrear el origen del polvo depositado en la superficie glaciar (CECs, 2013), Anglo American no realizó un análisis químico, mineralógico

Figura 3. Nube de polvo en el rajo abierto del proyecto minero Los Bronces ubicado en la cabecera de la subcuenca Río San Francisco, a un costado de la subcuenca Estero Yerba Loca



Nota. Fotografía del 3 de noviembre de 2023 tomada por Matías Romagosa.

o morfométrico de las muestras de polvo recolectadas en los puntos Piedra Carvajal y Los Sulfatos. Debido a esto, la Línea Base presentada para la evaluación ambiental del proyecto Los Bronces Integrado no permite conocer el peso-volumen y el origen del polvo potencialmente depositado en glaciares, y muestreado fuera de estos en el periodo 2016-2018.

Estimación del umbral de impacto de polvo para glaciares sin validación in situ

Anglo American declaró un umbral de afectación de polvo en glaciares de 200 mg/m²-día, punto desde el cual la ablación de la superficie glaciar comenzaría a ser afectada por el polvo. Este umbral derivó de la estimación del “albedo natural” en glaciares ubicados en la zona central de Chile y Argentina (CECs, 2017). En el estudio realizado por CECs (2017) estimamos que hay aspectos metodológicos discutibles, cuyos resultados de albedo natural y umbral de afectación de polvo no necesariamente son aplicables a los glaciares de la subcuenca Estero Yerba Loca.

CECs (2017) se basó en el rango de albedo utilizado por Painter et al. (2012) y Skiles et al. (2012) correspondiente a nieve fresca (0.5-0.95). Sin embargo, el albedo estimado para los glaciares por CECs (2017) entre 2014-2017 corresponde a hielo (0.34-0.51 según Cuffey & Paterson, 2010), variando entre entre 0.35 a 0.4 (percentil 50), con valores máximos de 0.5 (percentil 75). Debido a esto, el valor umbral de afectación de polvo establecido en CECs (2017) de 137 y 548 mg/m²-día, y supuestamente derivado del estudio de Painter et al. (2012) y Skiles et al. (2012), no tendría el mismo efecto en superficie de hielo

glaciar debido a que podría requerirse menos polvo para tener igual impacto, o por el contrario, podría requerirse mucho más, dependiendo de la ablación que exista en la superficie, cuya agua de fusión podría lavar ese material evitando un efecto en el cambio de albedo, tal como se discutió en CECs (2017, pp. 73-74).

A pesar del estudio en glaciares realizadas por CECs (2017) en la cuenca Olivares no hubo: mediciones para estimar la relación entre la concentración de polvo, el cambio de albedo relacionado y su efecto en la tasa de ablación (derretimiento y sublimación); no se estudió la redistribución de polvo depositado en la superficie glaciar durante distintas temporadas y su agregación a polvo de años anteriores; y tampoco se consideró el efecto que podría provocar una misma concentración de polvo en la superficie glaciar, pero compuesto por distinta mineralogía o tamaño.

El estudio CECs (2017) estimó una variabilidad natural del albedo del 15% aplicable sobre la superficie de glaciares sobre un rango de elevación extenso, y representativa de la mayor cantidad de los datos de superficie glaciar. Estas superficies no fueron identificadas para subcuencas específicas, las cuales pueden presentar altas diferencias climáticas locales (Caro et al., 2021), por lo que la variabilidad natural del albedo de 15% podría no ser representativa de los glaciares de la subcuenca Estero Yerba Loca.

En este contexto, el área de influencia del umbral de afectación de polvo sobre glaciares consideró además el transporte de polvo por viento. Sin embargo, la simulación del viento en una área extensa y montañosa fue validada sólo con datos de velocidad del viento registrados en la estación meteorológica Los Bronces, dejando de lado la validación de la dirección del viento. La información de esta estación no es de acceso público, lo que impide un análisis externo. Adicionalmente, la validación en términos de velocidad diaria no mostró resultados satisfactorios y la simulación no fue contrastada con mediciones dentro de la subcuenca Estero Yerba Loca. Estas deficiencias no permiten conocer el sesgo de la simulación de velocidad y dirección del viento, como tampoco la capacidad del viento para transportar el polvo en la zona.

Aspectos clave que debe contener el monitoreo de polvo sobre glaciares y que deben ser incorporados en la guía técnica del SEA

Los antecedentes expuestos en este estudio, permiten señalar que la depositación prolongada de polvo en la

superficie glaciar provoca cambios en su tasa de ablación superficial. Esta respuesta de la superficie glaciar a distintos espesores de polvo varía según las condiciones climáticas y las características del glaciar, según se detalló previamente. Debido a ello, se verá afectado el balance de masa glaciar y su dinámica, alterando la contribución hídrica de los glaciares a los ríos. A pesar de esto, la guía *Contenidos Técnicos para la Evaluación Ambiental del Recurso Hídrico del SEA* (2022b) no considera la medición del polvo en la superficie glaciar, su efecto en la tasa de derretimiento del glaciar y tampoco la medición explícita del balance de masa glaciar. Esta última es la principal variable en ser evaluada en el monitoreo de glaciares (Kaser et al., 2002; Rivera et al., 2017).

En este estudio proponemos que la guía SEA considere la estimación de tres tipos de datos complementarios, desde una escala puntual a una espacialmente distribuida.

Tipo 1. Mediciones puntuales. Consiste en caracterizar la respuesta del albedo y de las tasas de ablación superficial respecto a la presencia o no de distintos espesores, volúmenes y peso de polvo depositado en glaciares. Se debe considerar la medición de polvo, albedo, ablación y variables meteorológicas. Esta caracterización debe ser desarrollada mediante trabajos de campo mensuales y con énfasis a fines del período de acumulación (septiembre, ganancia de masa glaciar) y a fines del período de ablación (marzo, pérdida de masa glaciar), por lo menos durante un año en el glaciar más cercano al área emisora de polvo, cuya superficie supere las 2 ha durante la tramitación de la evaluación de impacto ambiental. Los resultados serán representativos de una ubicación específica y los datos medidos serán de carácter discreto y continuo. Luego de esta caracterización deben ser implementados los datos de Tipo 2.

Los datos Tipo 1 comprende el monitoreo de polvo depositado, de contenido de polvo en el glaciar (CPG), de polvo en el aire, de variables meteorológicas y de cambios de altura de la superficie glaciar, y la realización de experimentos de canchas de polvo (ECP). Nuestra propuesta fue inspirada en estudios previos realizados en glaciares de las cuencas Elqui y Maipo (Barandun et al., 2022; CECs, 2013; Cereceda et al., 2022):

- a. El monitoreo de polvo depositado considera la recolección de polvo en dos envases de plástico de 5 lts con tapas. Estos deben ser instalados a ambos costados de la superficie glaciar descubierta por detritos, y cerca de su elevación promedio. Una vez retirados, con una frecuencia mensual, deben ser enviados a un laboratorio

para el análisis de la muestra. Abajo se describen los componentes a ser analizados.

b. El monitoreo de CPG debe ser realizado manualmente en tres puntos en el glaciar y tres puntos fuera del glaciar: zona baja, zona alta y a la elevación de la ubicación de los contenedores recolectores de polvo (elevación promedio). Las mediciones de CPG serán realizadas al final del periodo de acumulación (muestras de núcleo de nieve desde superficie hasta el hielo) y al final del periodo de ablación (muestras desde núcleo de hielo en glaciar de 50-100 cm de longitud y desde ladera a un costado de la superficie glaciar). Abajo se describen los componentes a ser analizados.

c. El monitoreo de polvo en el aire permitirá conocer el polvo potencialmente depositado en el glaciar, lo cual complementará a) y b). Se propone la instalación de un muestreador activo de MP10 y MP2.5. El muestreador deberá instalarse cerca de la estación meteorológica y punto de recolección de polvo. El muestreador debe registrar datos por al menos una semana a fines del periodo de acumulación y a fines del periodo de ablación. El filtro de recolección se pesará antes y después del muestreo. Se contará con información respecto al flujo de aire, a partir del muestreador, para poder determinar la concentración total de partículas. Estas mediciones serán complementadas con los datos de viento registrados en la estación meteorológica. Las muestras de polvo serán sometidas al mismo procedimiento de análisis geoquímico que las muestras de polvo y CPG.

Las muestras de polvo, CPG y del muestreador de polvo serán sometidas a un análisis geoquímico que permitirá discriminar el origen del polvo hallado en el glaciar. Se considerarán los siguientes componentes que deberán ser seleccionados considerando la mineralogía cercana al glaciar y aquella que está siendo intervenida por la minera:

- Metales (19): Al, As, Ba, Be, B, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Hg, Mo, Ni, Ag, Pb, Se, V, Zn.
- Aniones (5): F-, Cl-, SO₄-2, Br-, NO₃-.
- Cationes (5): Li⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺.
- Granulometría (3): tamaño de partícula de polvo, peso y volumen de la muestra.

d. El monitoreo de variables meteorológicas se realizará considerando que el monitoreo de polvo en los tres puntos anteriores no permite una asociación con cambios en el albedo superficial y cambios en la tasa de ablación. Se debe instalar una estación meteorológica

y realizarse ECP. La estación meteorológica debe ser instalada a la elevación promedio del glaciar. Debe registrar horariamente al menos las siguientes variables: radiación solar incidente y reflejada, temperatura del aire, precipitación total, precipitación sólida, precipitación líquida, velocidad y dirección del viento, humedad relativa del aire y cambios en la altura de la superficie glaciar. Se debe agregar la instalación de dos balizas para registrar los cambios mensuales de altura de la superficie glaciar.

e. Los ECP serán desarrollados a la elevación de los envases recolectores de polvo y alejado por lo menos 100 m de la estación meteorológica. El ECP debe contar con 3 cuadrados de aproximadamente 2 m, alejados entre sí 10 m e instalados en línea de manera transversal al flujo del glaciar. Cada cuadrado debe poseer una capa de polvo de espesor 0,5 mm, 1 mm y 5 mm. El polvo puede ser extraído cerca del glaciar, debe poseer un diámetro capaz de ser transportado por el viento y que es posible de ser tamizado (75 µm, 0,075 mm) (Adebiyi et al., 2023; Betzer et al., 1988). Cada cuadrado del ECP debe poseer medición de cambio de altura de superficie, radiación solar incidente y reflejada registrada (albedo). Otras variables meteorológicas pueden ser extraídas de la estación meteorológica. Los registros de la estación meteorológica permitirán considerarla un 4to punto de monitoreo de cambio de superficie, la cual correspondería a la superficie sin intervención durante el periodo del experimento. Las canchas se implementarán sobre nieve a fines del periodo de acumulación y sobre hielo descubierto a fines del periodo de ablación. La medición debe compilar datos horarios continuos diurnos cada 1 hr. durante al menos 1 semana. Terminado el experimento, las canchas de polvo deberán ser retiradas.

Tipo 2. Mediciones espacialmente distribuidas. El producto satelital Landsat permitirá estimar el albedo de la superficie glaciar en toda su extensión por al menos 20 años. El albedo satelital debe ser validado y su sesgo corregido utilizando mediciones de campo Tipo 1. Las diferencias entre observaciones de albedo *in situ* y satelitales debe ser cuantificada en términos de bias y RMSE (Root Mean Squared Error) en al menos 1 año con al menos 1 dato mensual entre octubre y marzo. Las fechas y hora de los datos analizados deben coincidir con las del Tipo 1.

El albedo satelital (Barandun et al., 2022; Liang, 2001; Shaw et al., 2021) debe ser estimado utilizando imágenes Landsat previamente filtradas de nubosidad, permitiendo

observar el 100% de la superficie glaciar. El albedo debe ser estimado como:

$$\text{albedo} = 0.356 b_1 + 0.130 b_3 + 0.373 b_4 + 0.085 b_5 + 0.072 b_7 - 0.0018$$

Donde b_i representa la banda correspondiente a TM/ETM+ en banda i . Mientras que para OLI, el rango espectral de las bandas debe ser ajustado.

A partir de los datos Tipo 1 y 2 se deberá realizar un análisis de correlaciones entre las variables, polvo, albedo y ablación superficial las que permitirán estimar tasas de cambio distribuido. Los resultados serán representativos de la superficie glaciar y de carácter discreto. Luego de esta caracterización deben ser implementados los datos de Tipo 3.

Tipo 3. Simulación distribuida. A partir de los datos Tipo 1 y 2 y de su análisis se podrá llevar a cabo la simulación de cambios en la superficie glaciar por al menos 1 año. Simulaciones de la tasa de ablación y del balance de masa de la superficie glaciar deben considerar como datos de entrada: radiación solar incidente, radiación solar reflejada, temperatura del aire, precipitación, velocidad del viento y humedad relativa del aire. Se recomienda utilizar modelos numéricos que incorporen el método grado día mejorado (Enhanced Temperature-Index, ETI, Pellicciotti et al., 2005) y que permitan simular precipitación sólida y líquida, como TOPKAPI-ETH (Ayala et al., 2020). Otros modelos basados en la física como CRHM también pueden ser utilizados (Mejías et al., 2025). Los datos de entrada para el modelo deben utilizar los datos Tipo 1, pero también registros de temperatura del aire y precipitación total en por lo menos una ubicación dentro de la subcuenca. Estos registros deben comprender el mismo periodo de tiempo que se busca simular y pueden ser complementados con productos de reanálisis como ERA5 y CR2METv2.5 (Boisier et al., 2016). Los resultados de la simulación deben ser validados y los valores de parámetros calibrados con mediciones de terreno y satelitales. Esta simulación permitirá contar con datos distribuidos horarios de la superficie glaciar.

Los datos Tipo 1, 2 y 3 permitirán estimar un umbral de polvo depositado en la superficie glaciar que acelera la tasa de derretimiento natural del glaciar. Esto es posible ya que los envases recolectores de polvo, con diámetro de boca conocido y conocido el volumen y peso de la muestra de polvo, permitirá estimar un espesor aproximado por 1 m² de superficie glaciar. Complementariamente, a través de los ECP se conocerá la respuesta de la ablación de nieve y hielo en superficie glaciar en cuatro tipos de superficies.

Esta medición de ablación en el tiempo, permitirá obtener 4 curvas de derretimiento asociadas a 4 tipos de superficies y en relación a distintos valores de albedo. Esta relación podrá ser extrapolada espacial y temporalmente a través de los datos Tipo 3. La simulación de la superficie glaciar permitirá establecer umbrales de polvo depositados en distintas elevaciones, temporadas y años. El límite de afectación del derretimiento del glaciar por polvo estará definido por un incremento de la tasa de derretimiento encontrado fuera de la desviación estándar de derretimiento calculado para cada banda de elevación (sobre y bajo la elevación promedio, y elevación promedio, $n = 3$), considerando los períodos de acumulación y ablación del glaciar ($n = 2$) y años húmedo, seco y normal ($n = 3$). El análisis previo permitirá establecer 18 umbrales de polvo depositado para cada glaciar.

Conclusiones

Los glaciares que alimentan el río Maipo, son fundamentales para la seguridad hídrica de la ciudad de Santiago que alberga cerca del 40% de la población nacional, particularmente en temporadas secas cuando pueden aportar hasta el 100 % del caudal estival. Sin embargo, estos glaciares están siendo afectados por la depositación de polvo proveniente tanto de actividades mineras como urbanas, en un contexto de creciente incertidumbre hídrica asociada al cambio climático y la sobreexplotación del agua.

Es este estudio concluimos lo siguiente:

- La guía técnica del SEA (Contenidos Técnicos para la Evaluación Ambiental del Recurso Hídrico) no entrega lineamientos técnicos para que las empresas mineras identifiquen la cantidad y origen del polvo que se deposita en los glaciares. Esta omisión deja la identificación del impacto del polvo en glaciares en manos de la autorregulación minera, comprometiendo la seguridad hídrica de la ciudad de Santiago y dejándola a disposición del mercado.
- La DGA y el SEA carecen de herramientas necesarias para evaluar adecuadamente la afectación de glaciares por parte de la actividad minera durante el proceso de evaluación del impacto ambiental. Además, como responsables de velar por los recursos hídricos, estos organismos del Estado debieran promover la incorporación explícita de criterios para medir la afectación del polvo en la guía de evaluación del impacto ambiental.
- En un contexto de crisis climática, la normativa actual no protege efectivamente la contribución hídrica de los glaciares. Ejemplo de ello es la contradicción evidenciada en el caso del proyecto Los Bronces Integrado, rechazado

técnicamente por SEA (SEA, 2022a) y posteriormente aprobado por decisión gubernamental en 2023 (SEA, 2023). Esta situación ilustra cómo decisiones políticas siguen primando sobre criterios técnicos.

- La comunidad debe exigir cambios estructurales en la normativa ambiental que permita limitar la actividad minera en los ecosistemas glaciares. En este contexto, la promulgación de leyes ambientales ha mostrado una reducción de contaminantes atmosféricos provenientes de la minería sobre glaciares desde 1990 (Potocki et al., 2022).

Finalmente, en este estudio propusimos los lineamientos técnicos que deben ser incorporados en la guía Contenidos Técnicos para la Evaluación Ambiental del Recurso Hídrico del SEA, y que permiten conocer la relación entre polvo y glaciar, a través de una la metodología adecuada para medir el polvo depositado y su origen.

Financiamiento

Campañas de protección de los glaciares y el agua del año 2023 y 2024, Greenpeace Chile.

Declaración de autoría

Alexis Caro: Conceptualización, Investigación, Metodología, Visualización, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición.

Silvana Espinosa: Adquisición de fondos, Administración del proyecto, Visualización, Redacción – borrador original.

Carolina Concha: Metodología, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición.

Alexis Segovia: Redacción – borrador original.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la ilustradora científica Makarena Kramcsák por la edición de la Figura 2.

Conflictos de intereses

Los autores declaran que no tienen conflicto de interés.

Referencias bibliográficas

Adebiyi, A., Kok, J. F., Murray, B. J., Ryder, C. L., Stuut, J. B. W., Kahn, R. A., Knippertz, P., Formenti, P., Mahowald, N. M., García-Pando, C. P., Klose, M., Ansmann, A., Samset, B. H., Ito, A., Balkanski, Y., Di Biagio C., Romanias, M., Huang, Y. , & Meng, J. (2023). A review of coarse mineral dust in the Earth system. *Aeolian Research*, 60, 100849. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2022.100849>

Arenson, L. U., Jakob, M. , & Wainstein, P. (2014). Effects of Dust Deposition on Glacier Ablation and Runoff at the Pascua-Lama Mining Project, Chile and Argentina. *Engineering Geology for Society and Territory*, 1, 27-32. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09300-0_6

Ayala, Á., Farias-Barahona, D., Huss, M., Pellicciotti, F., McPhee, J., & Farinotti, D. (2020). Glacier runoff variations since 1955 in the Maipo River basin, in the semiarid Andes of central Chile. *The Cryosphere*, 14(6), 2005-2027. <https://doi.org/10.5194/tc-14-2005-2020>

Barandun, M., Bravo, C., Grobety, B., Jenk, T., Fang, L., Naegeli, K., Rivera, A., Cisternas, S., Münster, T., & Schwikowski, M. (2022). Anthropogenic Influence on Surface Changes at the Olivares Glaciers; Central Chile. *Sci. Total Environ.*, 833, 155068. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155068>

Betzer, P. R., Carder, K. L., Duce, R. A., Merrill, J. T., Tindale, N. W., Uematsu, M., Costello, D. K., Young, R. W., Feely, R. A., Berland, J. A., Bernstein, R. E., & Greco, A. M. (1988). Long-range transport of giant mineral aerosol particles. *Nature*, 336(6199), 568-571. <https://doi.org/10.1038/336568a0>

Boisier, J. P., Rondanelli, R., Garreaud, R. D., & Muñoz, F. (2016). Anthropogenic and natural contributions to the southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile. *Geophys. Res. Lett.*, 43(1), 413-421. <https://doi.org/10.1002/2015GL067265>

Boubel, R.W., Fox, D.L., Rurner, D.B., & Stern, A.C., (1994). *Fundamental of Air Pollution*. Academic Press, San Diego.

Bravo, C., Cisternas, S., Viale, M., Paredes, P., Bozkurt, D., & García-Lee, N. (2025). An unseasonal atmospheric river drives anomalous summer snow accumulation on glaciers of the subtropical Andes. *The Cryosphere*, 19, 1897-1913. <https://doi.org/10.5194/tc-19-1897-2025>

Caponi, L., Formenti, P., Massabó, D., Di Biagio, C., Cazaunau, M., Pangui, E., Chevaillier, S., Landrot, G., Andreae, M. O., Kandler, K., Piketh, S., Saeed, T., Seibert, D., Williams, E., Balkanski, Y., Prati, P., & Doussin, J.-F. (2017). Spectral- and size-resolved mass absorption efficiency of mineral dust aerosols in the shortwave spectrum: a simulation chamber study. *Atmos. Chem. Phys.*, 17(11), 7175-7191. <https://doi.org/10.5194/acp-17-7175-2017>

- Caro, A., Condom, T., Rabatel, A., Aguayo, R., & Champollion, N. (2025). Glacio-hydrological changes along the Andes throughout the 21st Century. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4714636/v1>
- Caro, A., Condom, T., and Rabatel, A. (2021). Climatic and Morphometric Explanatory Variables of Glacier Changes in the Andes (8–55°S): New Insights From Machine Learning Approaches. *Front. Earth Sci.*, 9, 713011. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.713011>
- Caro, A., Condom, T., Rabatel, A., Champollion, N., García, N., & Saavedra, F. (2024). Hydrological response of Andean catchments to recent glacier mass loss. *The Cryosphere*, 18(5), 2487-2507. <https://doi.org/10.5194/tc-18-2487-2024>
- Caro, A., Gimeno, F., Rabatel, A., Condom, T., & Ruiz, J. (2020). Glacier clusters identification across Chilean Andes using topo-climatic variables. *Investigaciones Geográficas*, 60, 119-133. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2020.59009>
- CECs. (2013). *Expediente: 1617 Plan de Monitoreo de Glaciares Pascua Lama versión 4 (PMGv4)*. BARRICK - PASCUA LAMA, Centro de Estudios Científicos. <https://snifa.sma.gob.cl/SeguimientoAmbiental/Ficha/1617>
- CECs. (2017). *Estudio de glaciares descubiertos (Blancos)*, Centro de Estudios Científicos. Anexo 3.11-A. Proyecto Codelco División Andina. <https://infofirma.sea.gob.cl/DocumentosSEA/MostrarDocumento?docId=98/af/489047648e6d57df8d21750bbb6006f0ceff>
- Cereceda-Balic, F., Ruggeri, M. F., Vidal, V., Ruiz, L., and Fu, J. S. (2022). Understanding the role of anthropogenic emissions in glaciers retreat in the central Andes of Chile. *Environ. Res.*, 214, 113756. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113756>
- Cichowicz, R., Wielgosiński, G., & Fetter, W. (2020). Effect of wind speed on the level of particulate matter PM10 concentration in atmospheric air during winter season in vicinity of large combustion plant. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 77(1), 35-48. <https://doi.org/10.1007/s10874-020-09401-w>
- Codelco. (2025). *Codelco y Anglo American firman histórico Memorándum de Entendimiento para impulsar el desarrollo del distrito minero Andina - Los Bronces*. <https://www.codelco.com/prensa/2025/alianza-andina-los-bronces>
- Cuffey, K., & Paterson, W. (2010). *The Physics of Glaciers*. Academic Press.
- DGA. (2012). *Plan de acción para la conservación de glaciares ante el cambio climático*. Dirección General de Aguas, Ministerios de Obras Públicas, Gobierno de Chile, S.I.T. N° 306. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/items/0f6c8141-b8a3-4d65-a5bf-01cd9b2db810>
- DGA. (2014). *Caracterización glacioquímica de elementos traza en muestras de nieve*. Dirección General de Aguas, Ministerios de Obras Públicas, Gobierno de Chile, S.I.T. N° 351. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/server/api/core/bitstreams/d4d8ef96-d581-4542-8a24-d509f1786199/content>
- DGA. (2015a). *Diagnóstico plan maestro de recursos hídricos Región Metropolitana de Santiago*. Dirección General de Aguas, Ministerios de Obras Públicas, Gobierno de Chile, S.I.T. N° 371. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/items/c053dbd4-5181-4ec5-a562-bc6d2aacc98bf>
- DGA. (2015b). *Actualización de la evaluación de los recursos hídricos superficiales en la cuenca del Río Maipo*. Dirección General de Aguas, Ministerios de Obras Públicas, Gobierno de Chile, SDT N° 369. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/server/api/core/bitstreams/98c86bbc-f034-4b8d-bac5-adbe19ef5a56/content>
- DGA. (2018). *Diseño y construcción de la red de monitoreo para glaciología y cambio climático*. Dirección General de Aguas, Ministerios de Obras Públicas, Gobierno de Chile, S.I.T. N° 411. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/server/api/core/bitstreams/861485d8-a8fd-40cb-b31b-ec59765acb97/content>
- DGA. (2021). *Variaciones recientes de glaciares en Chile, según principales zonas glaciológicas*. Dirección General de Aguas, Ministerios de Obras Públicas, Gobierno de Chile, S.I.T. N° 261. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/items/507f7130-4e5c-437f-891b-cd98ade9f72a>
- DGA. (2022). *Inventario público de glaciares de Chile*. Dirección General de Aguas, Ministerios de Obras Públicas, Gobierno de Chile.
- DGA. (2024). *Definiciones estratégicas de la Dirección General de Aguas*. <https://dga.mop.gob.cl/uploads/sites/13/2024/07/A1-2024-2026-Definiciones-Estategicas.pdf>

- Dussaillant, I., Berthier, E., Brun, F. et al. (2019). Two decades of glacier mass loss along the Andes. *Nat. Geosci.*, 12, 802-808. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0432-5>
- 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). *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 114, D04102. <https://doi.org/10.1029/2008jd010519>
- Farías-Barahona, D., Ayala, Á., Bravo, C., Vivero, S., Seehaus, T., Vijay, S., Schaefer, M., Buglio, F., Casassa, G., & 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. <https://doi.org/10.3390/rs12101658>
- Garreaud, R. D., Álvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., and Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010-2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 6307-6327. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>
- Garreaud, R.D., Vuille, M., Compagnucci, R., & Marengo, J. (2009). Present-day South American climate. *Palaeogeogr. Palaeocl.*, 281(3-4), 180-195. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.10.032>
- Geoaire. (2015). *Informe mediciones de material particulado sedimentable (MPS) proyecto Pascua Lama, primer semestre*. Geoaire Limitada. <https://snifa.sma.gob.cl/SeguimientoAmbiental/Ficha/35654>
- Gilardoni, S., Di Mauro, B., & Bonasoni, P. (2022). Black carbon, organic carbon, and mineral dust in South American tropical glaciers: a review. *Glob. Planet Chang.*, 213, 103837. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103837>
- Hanna, E., Mernild, S.H., Yde, J.C., Villiers, S. de. (2017). Surface Air Temperature Fluctuations and Lapse Rates on Olivares Gamma Glacier, Rio Olivares Basin, Central Chile, from a Novel Meteorological Sensor Network. *Advances in Meteorology*, 6581537, 15. <https://doi.org/10.1155/2017/6581537>
- Hernández, J., Paredes, P., Carrión, D., & Rivera A. (2017). *Ice elevation changes surveyed with Airborne Laser Scanning Data*. First international symposium on geoscience and remote sensing (GRSS-CHILE). <https://doi.org/10.1109/GRSS-CHILE.2017.7996012>
- Herrera, P., & Segovia, A. (2019). Ley de Protección de Glaciares: El devenir de un conflicto socioambiental. *Investigaciones Geográficas: Una Mirada Desde El Sur*, 58, 119-135. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2019.52214>
- Ibáñez, C., & Robledo Ceballos, J. (2022). Glacier retreat with optical and radar images: Olivares Glacier and Juncal sur. *Revista Geográfica De Chile Terra Australis*, 58(2). <https://doi.org/10.23854/07199562.202258esp.Ibanez45>
- JVRM. (2025). *Declaración de la Junta de Vigilancia del río Maipo primera sección*. <https://portalmetropolitano.cl/el-estado-de-las-fuentes-de-agua-para-la-rm-y-la-incertidumbre-para-la-disponibilidad-futura/>
- Kaser, G., Fountain, A.G., & Jansson, P. A. (2002). Manual for monitoring the mass balance of mountain glaciers. *IHP-VI- Technical documents in hydrology*, 59.
- Lapere, R., Huneeus, N., Mailler, S., Menut, L., & Couvidat, F. (2023). Meteorological export and deposition fluxes of black carbon on glaciers of the central Chilean Andes. *Atmos. Chem. Phys.*, 23(2), 1749-1768. <https://doi.org/10.5194/acp-23-1749-2023>
- Lapere, R., Menut, L., Mailler, S., & Huneeus, N. (2021). Seasonal variation in atmospheric pollutants transport in central Chile: dynamics and consequences. *Atmos. Chem. Phys.*, 21(8), 6431-6454. <https://doi.org/10.5194/acp-21-6431-2021>
- Liang, S. (2001). Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 76(2), 213-238. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00205-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00205-4)
- Lliboutry, L. (1998). Glaciers of South America I-6 – Glaciers of Chile and Argentina. In J. S. Williams & J. G. Ferrigno (Eds.), *Geological survey professional paper 1386-I, SATELLITE IMAGE ATLAS of glaciers of the world*. United States government printing office, Washington, DC.

- Malmros, J. K., Mernild, S. H., Wilson, R., Yde, J. C., & Fensholt, R. (2016). Glacier Area Changes in the central Chilean and Argentinean Andes 1955–2013/14, *J. Glaciol.*, 62(232), 391-401. <https://doi.org/10.1017/jog.2016.43>
- Marangunic, C., Ugalde, F., Apey, A., Armendáriz, I., Bustamante, M., & Peralta, C. (2021). *Ecosistemas de montaña de la cuenca alta del río Mapocho, Glaciares en la cuenca alta del río Mapocho: variaciones y características principales*. AngloAmerican – CAPES UC, Santiago de Chile
- Masiokas, M. H., Christie, D. A., Le Quesne, C., Pitte, P., Ruiz, L., Villalba, R., Luckman, B. H., Berthier, E., Nussbaumer, S. U., González-Reyes, Á., McPhee, J., & Baraza, G. (2016). Reconstructing the annual mass balance of the Echaurren Norte glacier (Central Andes, 33.5° S) using local and regional hydroclimatic data. *The Cryosphere*, 10(2), 927-940. <https://doi.org/10.5194/tc-10-927-2016>
- Mejías, A., McPhee, J., Mahmoud, H., Farías-Barahona, D., Kinnard, C., MacDonell, S., Montserrat, S., Somos-Valenzuela, M., & Fernández, A. (2025). Multidecadal estimation of hydrological contribution and glacier mass balance in the semi-arid Andes based on physically based modeling and geodetic mass balance. *Front. Earth Sci.*, 13, 1517081. <https://doi.org/10.3389/feart.2025.1517081>
- Oerlemans, J., Giesen, R.H., & Van Den Broeke, M.R. (2009). Retreating alpine glaciers: increased melt rates due to accumulation of dust (Vadret da Morteratsch, Switzerland). *Journal of Glaciology*, 55(192), 729-736. <https://doi.org/10.3189/002214309789470969>
- Painter, T. H., Skiles, S. M., Deems, J. S., Bryant, A. C., & Landry, C. C. (2012). Dust radiative forcing in snow of the Upper Colorado River Basin: 1. A 6-year record of energy balance, radiation, and dust concentrations. *Water Resources Research*, 48(7), 1-14. <https://doi.org/10.1029/2012WR011985>
- Pellicciotti, F., Brock, B., Strasser, U., Burlando, P., Funk, M., Corripio, J. (2005). An enhanced temperature-index glacier melt model including the shortwave radiation balance: development and testing for Haut Glacier d'Arolla, Switzerland. *Journal of Glaciology*, 51(175), 573-587. <https://doi.org/10.3189/172756505781829124>
- Peña, H., & Nazarala, B. (1987). *Snowmelt-runoff simulation model of a central Chile Andean basin with relevant orographic effects*, in: *Large Scale Effects of Seasonal Snow Cover*. Proceedings of the Vancouver Symposium. <http://www.csa.com/partners/viewrecord.php?requester=gs&collection=ENV&recid=9001865>
- Peña, M. A., & Olmedo, F. (2019). Estimating spatiotemporal variations of albedo in the Olivares glaciers, central Chile. *Revista Geográfica De Chile Terra Australis*, 55(1), 35-44. <https://doi.org/10.23854/07199562.2019551.Pena35>
- Potocki, M., Dixon, D. A., Kurbatov, A. V., Casassa, G., Zamora, R., Handley, M. J., Introne, D., Grigholm, B., Korotkikh, E. V., Birkel, S. D., et al. (2022). Trace metal emission history captured in a Chilean ice core. *Atmos. Environ.*, 276, 119002. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119002>
- Rivera, A., Bown, F., Napoleoni, F., Muñoz, C., & Vuille, M. (2017). *Manual Balance de masa glaciar*. Centro de Estudios Científicos, University at Albany. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/items/dd580028-0042-40f7-a628-d3414f5c7808>
- Rutllant, J., & Fuenzalida, H. (1991). Synoptic aspects of the central chile rainfall variability associated with the Southern Oscillation. *Int. J. Climatol.*, 11(1), 63-76. <https://doi.org/10.1002/joc.3370110105>
- SEA. (2001). *Estudio de Impacto Ambiental de Pascua Lama*. Servicio de Evaluación Ambiental. https://seia.sea.gob.cl/seia-web/ficha/fichaPrincipal.php?id_expediente=3053&idExpediente=3053
- SEA. (2022a). *Resolución de Calificación Ambiental N° 20229900122/2022*. Estudio de Impacto Ambiental de Proyecto Los Bronces Integrado.
- SEA. (2022b). *Criterio de evaluación en el SEIA: Contenidos técnicos para la evaluación ambiental del recurso hídrico*. Servicio de Evaluación Ambiental. https://www.sea.gob.cl/sites/default/files/imce/archivos/2022/09/21/05_dt_recurso_hidrico.pdf
- SEA. (2023). *Resolución N°202399101873/2023*. Estudio de Impacto Ambiental de Proyecto Los Bronces Integrado.
- SEA. (2024). *Misión del Servicio de Evaluación Ambiental*. <https://www.sea.gob.cl/mision>

SEA. (2025). *Línea Base proyecto los Bronces Integrado*.
<https://infofirma.sea.gob.cl/DocumentosSEA/MostrarDocumento?docId=da/26/9e785f72eae4b449e760e3547cd08f8c5359>

Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change* (3rd ed.). Wiley.

Segovia, A., & Casassa, G. (2025). Valoración de servicios ecosistémicos vinculados al recurso hídrico de los glaciares de las cuencas Olivares- Colorado, Andes de Chile Central. *Revista de Geografía Norte Grande*, (91).
<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022025000200103>

Shaw, T. E., Ulloa, G., Farías-Barahona, D., Fernández, R., Lattus, J.M., & McPhee J. (2021). Glacier albedo reduction and drought effects in the extratropical Andes, 1986-2020. *Journal of Glaciology*, 67(261), 158-169.
<https://doi.org/10.1017/jog.2020.102>

Skiles, S. M., Painter, T. H., Deems, J. S., Bryant, A. C., & Landry, C. C. (2012). Dust radiative forcing in snow of the Upper Colorado River Basin: 2. Interannual variability in radiative forcing and snowmelt rates. *Water Resources Research*, 48(7), 1-11. <https://doi.org/10.1029/2012WR011986>

Takeuchi, N., & Li, Z. (2008). Characteristics of Surface Dust on Ürümqi Glacier No. 1 in the Tien Shan Mountains, China. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 40(4), 744-750. <https://infofirma.sea.gob.cl/DocumentosSEA/MostrarDocumento?docId=da/26/9e785f72eae4b449e760e3547cd08f8c5359>

Zardi, D., & Whiteman, C. D. (2013). Diurnal mountain wind systems. In F. K. Chow, S. F. J. De Wekker, & B. Snyder (Eds.), *Mountain weather research and forecasting* (pp. 35-119). Springer.