



REPÚBLICA DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
UNIDAD DE GLACIOLOGÍA Y NIEVES
REGIÓN METROPOLITANA

CARACTERIZACIÓN GLACIOQUÍMICA DE ELEMENTOS TRAZA EN MUESTRAS DE NIEVE

REALIZADO POR:

CENTRO DE TECNOLOGÍAS AMBIENTALES
DE LA
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
(CETAM - UTFSM)

RESUMEN EJECUTIVO

S.I.T. Nº 351

Santiago, diciembre 2014

I. INTRODUCCIÓN

En Chile los glaciares son uno de los recursos naturales menos estudiados, a pesar de ser considerados estratégicos para la economía en el mediano plazo (Rivera y Acuña 1997). Las investigaciones glaciológicas se han desarrollado principalmente en la Patagonia, donde se encuentran las mayores masas de hielo del hemisferio sur (Casassa et al. 2000a; Rivera and Casassa, 2000). Se estima que el aumento de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones en el siglo XX tuvieron un papel importante en el comportamiento reciente de los glaciares, mostrando una tendencia general de retroceso y pérdida de masa (Casassa, 1995; Casassa et al. 2000b; Rivera et al. 2000a; Rivera et al. 2002).

El balance de masa de un glaciar está unido a su hidrología y a la atmósfera (Braithwaite, 2002) y está definido como la suma algebraica entre la acumulación y ablación, o la pérdida de masa al final del periodo de un año, o el cambio neto en la masa (volumen equivalente de agua), entre dos periodos sucesivos (Ostrem y Brugman, 1991). El proceso más importante de acumulación de masa es la deposición de nieve (Benn & Evans, 1998), que está directamente relacionado con la circulación atmosférica y su interacción con el relieve local (Oerlemans, 2001). La ablación se refiere a la retirada de la nieve y el hielo de un glaciar, debido principalmente a la fusión, así como también por procesos de evaporación y sublimación favorecidos por la acción del viento (Benn and Evans, 1998). El proceso de fusión de un glaciar también está determinado por el balance de energía que se produce en la interfaz superficie-atmósfera (Braithwaite, 1995, Oerlemans, 2001). Una parte importante de la energía radiante que llega a un glaciar es reflejada según el albedo de la superficie, que oscila entre valores de 0,8 en nieve fresca y 0,3 en hielo con presencia de sustancias exógenas a su naturaleza propia, las que en la literatura reciben el nombre de contaminantes o impurezas (Lliboutry, 1956). En este sentido, el albedo medido en el hemisferio norte ha mostrado ser más bajo que el valor teórico para nieve pura (0,8), esta diferencia observada se explica por el posible contenido actual de hollín o black carbon (BC) en el manto nivoso. El origen de este BC se debe, muy probablemente, a la contaminación de origen industrial del hemisferio norte (Warren and Wiscombe 1980). Las impurezas o contaminantes que son más propensos a tener un efecto generalizado sobre el albedo de la nieve son el hollín, el polvo de origen crustal (de composición similar a la corteza terrestre), las cenizas volcánicas u otros aerosoles atmosféricos de origen antropogénicos. El hollín es aproximadamente 50 veces más efectivo que el polvo (material particulado) y cerca de 200 veces más eficaz que las cenizas en la reducción del albedo de la nieve (Warren S. 1984).

Numeroso autores como Paul et al. 2005, Ming et al. 2009, Kaspari et al. 2011, Doherty et al. 2010, Aamaas et al. 2011 entre otros, observaron un enriquecimiento de BC en la superficie de la criósfera, este proceso puede deberse a que los aerosoles emitidos a la atmósfera como resultado de procesos naturales y antropogénicos, pueden ser removidos a través de fenómenos de deposición húmeda, y/o seca introduciendo partículas y/o gases en la nieve incrementando su ablación, por lo tanto acelerando la pérdida de masa del glaciar, disminuyendo la superficie de reflexión, lo cual finalmente impacta sobre el clima.

La importancia de los aerosoles sobre el fenómeno de cambio climático global, está aún lejos de entenderse completamente, quedando muchas preguntas sin respuesta. Una de ellas es el rol de los aerosoles y partículas atmosféricas, donde aquellas con un claro origen antropogénico y en general de fuentes móviles y fijas (industrias que utilizan procesos de combustión) están compuestas principalmente de black carbon (BC) y participan en la ablación de la nieve y la pérdida de masa de un glaciar.

El incremento de la actividad antropogénica, combinada con el crecimiento económico de los países en desarrollo como Chile, demandan un gran consumo energético, el cual es satisfecho principalmente con combustibles fósiles (IMPUESTO AL CARBONO 2010), lo cual ha traído como consecuencia un incremento en las emisiones de material particulado, pudiendo también impactar a los glaciares de Los Andes centrales de Chile. Por otra parte, Chile posee una superficie aproximada de 23.000 km² de hielo por lo que se hace indispensable contar con un monitoreo detallado sobre su situación.

El presente documento presenta los resultados del estudio denominado "Caracterización Glacioquímica de Elementos Traza en Muestras de Nieve" realizado por el Centro de Tecnologías Ambientales (CETAM) de la Universidad Técnica Federico Santa María, en el marco de la Licitación Pública ID1019-53-LP14 de la Unidad de Glaciología y Nieves de la Dirección General de Aguas, perteneciente al Ministro de Obras Públicas.

Para este estudio, se realizaron campañas de monitoreo en los glaciares Bello (GB) y Olivares Alfa (GOA) entre los días 12-30 Septiembre y 21-29 Octubre del 2014, respectivamente, las que consideraron la toma de muestras de nieve tanto superficial como en profundidad para la determinación de iones, elementos traza, además de otros parámetros físico-químicos como densidad de la nieve, pH y conductividad eléctrica. Se realizó también monitoreo en tiempo real de material particulado atmosférico (PM) y Black Carbon (BC), además de meteorología, incluida la radiación solar para la determinación de albedo. En forma paralela a las campañas de monitoreo en los glaciares, se realizó una campaña de monitoreo atmosférico en la ciudad de Santiago donde se midieron los mismos contaminantes que fueron medidos en los glaciares.

II. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

Realizar la caracterización química de muestras de nieve y medir la concentración y distribución de material particulado atmosférico para los Glaciares Olivares Alfa y Bello.

3.2 Objetivos Específicos

1. Realizar la recolección de muestras de nieve para su caracterización química en los Glaciares Olivares Alfa y Bello.

2. Analizar la concentración y distribución del material particulado atmosférico presente en el ambiente glaciar.
3. Determinar de qué manera el material particulado afecta el albedo de los glaciares en estudio.
4. Analizar la concentración y distribución del material particulado muestreado en la estación MACAM, Región Metropolitana.

III. METODOLOGÍAS

Muestreos de nieve

La preparación de material de muestreo, selección de lugares y realización de los muestreos de nieve se realizaron de acuerdo a protocolos establecidos por USGS (Snowpack Chemistry Monitoring Protocol for the Rocky Mountain Network; Narrative and Standard Operating Procedures).

La figura 1 muestra la ubicación de los glaciares Bello y Olivares Alfa en verde, faenas mineras de relevante importancia en amarillo y ciudades más cercanas a los glaciares.



Figura 1: Ilustración de glaciares monitoreados, faenas mineras y principales ciudades.

Se seleccionó el lugar de muestreo de forma visual en primer lugar, teniendo la precaución de que el sitio no estuviese intervenido. Una vez seleccionado el sitio se procedió a medir la profundidad de nieve utilizando una sonda de avalanchas. Seleccionado el punto de muestreo, se demarcó un área de alrededor 2 m² para comenzar a cavar la calicata o pozo de nieve. Finalmente se cavaron tres calicatas por glaciar hasta llegar al hielo del mismo. En el área seleccionada para la excavación de cada calicata se trazó una línea perpendicular a la dirección

del sol para seleccionar la pared sombreada de la calicata a muestrear. Se cavó cada calicata utilizando palas de aluminio, teniendo la precaución de no transitar por la zona de excavación y la zona de acumulación de nieve. Una vez cavada cada calicata, se midió su profundidad. Se seleccionó la pared sombreada de cada calicata para la toma de muestras y otra pared para realizar las mediciones de densidad de nieve. La pared para toma de muestras se limpió utilizando una pala de policarbonato previamente lavada con un estricto protocolo de limpieza y se definió el intervalo de profundidades de toma de muestras en función de la profundidad de la calicata; para calicatas de 2 m, muestras cada 20 cm.

Durante el muestreo se tomaron muestras cada 20 cm (estratos) utilizando palas plásticas previamente lavadas con un estricto protocolo de limpieza y separando cada estrato de muestreo con bandejas plásticas limpias para así evitar contaminación interestratos. Las muestras tomadas se almacenaron en bolsas estériles Whirlpack (USA) de 2 L de capacidad, previamente etiquetadas. Posteriormente las muestras separadas en bolsas se almacenaron en cajas especiales para transporte de material de aislapol de alta densidad de 100 L de capacidad (procedencia alemana). En la pared contigua a la de toma de muestras se procedió a la medición de la densidad de nieve utilizando palas del tipo RIP 1 Cutter (1000 cc), Snowmetrics, USA. Utilizando una balanza granataria de 0,01 g de exactitud. En primer lugar se pesó la pala de densidad vacía, luego, cuidadosamente se introdujo la pala en un punto de los primeros 20 cm de pared de la calicata, teniendo cuidado de no compactar la nieve, posteriormente se removió la pala de densidad de la pared de la calicata teniendo la precaución de que la nieve sacada ocupe todo el volumen de la pala y no estuviese compactada. Finalmente se pesó la pala de densidad con nieve para realizar el cálculo de densidad.

Para el muestreo de nieve superficial se demarcó un área de alrededor de 10 m² en las cercanías de la calicata de donde se seleccionaron 3 puntos de 1 m² para la toma de muestras, teniendo las mismas precauciones que para la selección del sitio de la calicata. En cada punto de muestreo de nieve superficial se midió un cuadrado de 1m x 1m, se excavaron los primeros 5 cm de nieve con una pala plástica previamente lavada (mismo protocolo de limpieza). La nieve excavada se homogenizó y se almacenó en bolsas estériles Whirlpack (USA) de 2 L de capacidad previamente etiquetadas. Posteriormente las muestras separadas en bolsas se almacenaron en cajas especiales para transporte de material de aislapol de alta densidad de 100 L de capacidad (procedencia alemana).

Medición de material particulado (MP)

Se utilizó un equipo espectrómetro láser de aerosoles, modelo EDM107 de la firma GRIMM, Alemania, capaz de determinar en tiempo real a intervalos mínimos de 6 segundos, la concentración de PM₁₀, PM_{2,5} y PM₁, además de determinar el número y distribución de partículas en 31 tamaños distintos, entre 0,265 y 34 µm (en 31 canales distintos). Este equipo opera en conformidad con la metodología EPA EQPM-0311-195.

El monitoreo continuo se realizó en los tres sitios de muestreo; el glaciar Bello, el glaciar Olivares Alfa y en Santiago en la Estación Parque O´Higgins de

la red MACAM, seleccionada por su representatividad. El monitoreo en Santiago se realizó con un segundo equipo GRIMM de las mismas características y de manera paralela a las campañas en los glaciares. Se monitoreó durante al menos 7 días continuos en cada uno de los sitios seleccionados.

En la estación Parque O´Higgins se instaló, además, un equipo de monitoreo atmosférico del tipo Low-Vol Partisol 2300-Speciation Sampler de la firma Thermo, USA, cuyo funcionamiento está diseñado de acuerdo a la metodología EPA IO-2,3. Este equipo cuenta con canales independientes para la utilización de hasta 4 cartridges para especiación química. Se utilizaron cartridges equipados con filtros de cuarzo para el análisis de elementos asociados al material particulado, como también cartridges equipados con filtros de teflón y honeycomb denuders para el análisis de iones asociados tanto a la fase particulada como a la fase gaseosa del aerosol atmosférico (iones). El monitoreo con este equipo se realizó diariamente y en forma paralela a cada una de las campañas realizadas en los glaciares.

Medición de Black Carbon

Se utilizó un micro-aethalómetro modelo AE-51 de la firma Aethalometrics, USA, equipo portátil que permite medir BC en tiempo real con intervalos mínimos de medición de 10 segundos. La medición de BC en Santiago se realizó utilizando un equipo Thermo Scientific 5012 MAAP Multi-Angle, USA.

Medición de variables meteorológicas y albedo

Para medición de albedo se utilizó un equipo Net radiometer modelo CNR-4 conectado a un datalogger LogBox SD, ambos de la firma Kipp & Zonen, Suiza. Para la medición del resto de las variables meteorológicas se utilizó una estación meteorológica U30, de la firma HOBO, USA, equipada con sensores de medición de T°, %HR, dirección y velocidad de viento.

Análisis de muestras de nieve y aerosoles

Las muestras de aerosoles así como las de nieves recolectadas en glaciares y las muestras de aerosoles recolectadas en la ciudad de Santiago se analizaron según la metodología que se presenta a continuación y los resultados obtenidos se pueden revisar en este informe final.

Determinación de elementos traza en nieve recolectada en glaciar

Las muestras de nieve fueron sometidas a análisis de especiación química, determinando la concentración de elementos traza mediante Espectrometría de Masas con fuente de Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS) utilizando un equipo ELAN DRC II de Perkin Elmer, USA. Las muestras fueron acidificadas (5%) y filtrada previo a su análisis. Se realizaron estudios de influencia de la matriz de los extractos en cada una de las señales analíticas, comparando las pendientes por curva de calibración normal y adición estándar, este estudio se realizó a través del test t de student para comparar conjuntos de datos al 95%

de probabilidad. Se realizaron estudios de exactitud de la metodología completa (digestión más cuantificación) mediante el análisis material particulado con una concentración certificada de los analitos de interés (material de referencia), estas muestras se adquirieron en el mercado de materiales de referencia (NIST, BCR o CRC). Además se realizaron estudios de recuperación contaminando artificialmente parte de los extractos de manera de asegurar que no existen pérdidas significativas de analito durante la etapa de cuantificación. Todos estos ensayos fueron realizados mediante el test t student de comparación de un valor aceptado como verdadera al 95% de probabilidad.

Determinación de pH, conductividad eléctrica y especies iónicas en nieve recolectada en glaciar

Las muestras obtenidas tanto de nieve superficial como en calicata se sometieron a análisis de pH y conductividad in situ, así como también en cada estrato determinado en la calicata se midió la densidad de la nieve. La medición de pH y conductividad fue realizada con un instrumento de terreno previa calibración de éste, con soluciones buffer y de conductividad certificadas. Los iones inorgánicos Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} se determinaron y cuantificaron mediante cromatografía iónica en un cromatógrafo iónico 850 Professional IC de Metrohm, Suiza, que permite llevar a cabo separaciones isocráticas con detección por conductividad. Para el análisis de aniones se utilizó una columna Metrosep A Supp 5 (Metrohm). Para el análisis de cationes se utilizó una columna Metrosep C4 250/4,0 (Metrohm).

La determinación de la concentración de los distintos cationes y aniones en muestras de nieve se realizó mediante el método de curva de calibrado. La identificación se realizó utilizando el criterio de tiempos de retención (tr) y la cuantificación mediante la relación de áreas de picos cromatográficos respecto de las concentraciones en análisis, considerando el Límite de Detección del cromatógrafo ($3 \times \text{Sd}_{\text{blanco}}$). En ambos casos, identificación y cuantificación, se utilizaron los estándares de calibración del método como unidades de referencia.

Determinación de elementos traza en Material Particulado recolectado en Santiago.

Digestión de filtros

Las muestras de material particulado recolectado sobre filtros de cuarzo fueron sometidas a ataque con mezclas ácidas oxidantes compuestas de mezclas de HNO_3 y HCl , calidad suprapuro en proporciones de agua regia. Las muestras fueron digeridas en recipientes cerrados de bombas de teflón por 24 horas para luego completar la digestión aplicando temperaturas de 170°C por 3 horas. Todas las muestras fueron realizadas en duplicado considerando además un blanco de digestión el cual fue considerado en los cálculos cuantitativos.

Filtración y enrase de los extracto

Todos los extractos fueron filtrados previo a su análisis por Espectrometría de Masas con fuente de Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS), para ello se utilizaron filtros de membrana $0,45 \mu\text{m}$ resistentes a ácidos y libres de ceniza,

el recipiente de digestión se lavó con agua destilada y desionizada repetidas veces para asegurar la transferencia cuantitativa de los analitos a un aforo para su posterior enrase con agua de la misma calidad, se utilizó el mínimo consumo de agua posible de manera de evitar diluciones innecesarias.

Análisis de extractos mediante ICP-MS

Todos los extractos enrasados y pesados fueron sometidos a análisis de especiación química, determinando la concentración de elementos traza mediante ICP-MS utilizando un equipo ELAN DRC II, Perkin Elmer USA.

Se realizaron estudios de influencia de la matriz de los extractos en cada una de las señales analíticas, comparando las pendientes por curva de calibración normal y adición estándar, este estudio se realizó a través del test t de student para comparar conjuntos de datos al 95% de probabilidad.

Se realizaron estudios de exactitud de la metodología completa (digestión más cuantificación) mediante el análisis material particulado certificado con una concentración conocida de los analitos de interés (material de referencia), estas muestras se adquirieron en el mercado de materiales de referencia (NIST, BCR o CRC). Además se realizaron estudios de recuperación contaminando artificialmente parte de los extractos de manera de asegurar que no existen pérdidas significativas de analito durante la etapa de cuantificación. Todos estos ensayos fueron realizados mediante el test t student de comparación de un valor aceptado como verdadera al 95% de probabilidad.

Determinación de Iones en aerosoles atmosféricos recolectados en Santiago

Extracción de la muestra desde Filtros y Denuders

Para la extracción de filtros de poliamida con partículas, éstos fueron colocados dentro de un vaso precipitado de vidrio, se adicionó agua desionizada y se sometió a extracción por microondas por 10 minutos. El extracto posteriormente fue filtrado y enrasado. Por otro lado, para la extracción de los Denuders, uno de los extremos del denuder fue cubierto con su tapa de polietileno y se adicionó agua desionizada (Figura A). Posteriormente el denuder es cerrado en su otro extremo por una segunda tapa para ser sometido a agitación manual vigorosa (Figura B). Después de la agitación la tapa es removida cuidadosamente. La mayor parte del extracto se encuentra en los canales y tapa sin agujero del denuder. El denuder es desprendido cuidadosamente de la segunda tapa, procurando que la mayor cantidad de extracto se encuentre en esta tapa (Figura 2). El análisis requiere 7 a 8 mL de extracto los cuales son transferidos a vial con pipeta pasteur.

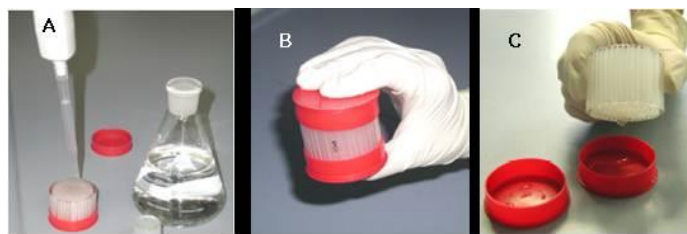


Figura 2: Fases de extracción de muestras de aerosoles atmosféricos inorgánicos en fase gaseosa.

Filtración y enrasado de extractos

Para el caso específico de la extracción del filtro, el material particulado presente y extraído en la etapa anterior fue eliminado mediante ultrafiltración a vacío, utilizando sistemas especialmente diseñados para asegurar la calidad analítica del proceso, evitando los procesos de contaminación intra-laboratorio y los efectos de memoria.

Análisis de extractos mediante cromatografía iónica (IC)

Los iones inorgánicos Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} , se determinaron y cuantificaron mediante cromatografía iónica en un cromatógrafo iónico 850 Professional IC de Metrohm, Suiza.

Para el análisis de aniones se utilizó una columna Metrosep A Supp 5 (Metrohm). Los análisis se realizaron con supresión de cationes. Para el análisis de cationes se utilizó una columna Metrosep C4 250/4,0 (Metrohm). La determinación de los distintos cationes y aniones en muestras de nieve se realizó mediante el método de curva de calibrado. La identificación se realizó utilizando el criterio de tiempos de retención (t_r) y la cuantificación mediante la relación de áreas de picos cromatográficos respecto de las concentraciones en análisis, considerando el Límite de Detección del cromatógrafo ($3 \times \text{Sd}_{\text{blanco}}$). En ambos casos, identificación y cuantificación, se utilizaron los estándares de calibración del método como unidades de referencia.

Para el análisis de los datos se utilizó el programa StatGrafics Centurion. Con él se realizaron diversas pruebas estadísticas, tanto descriptivas como comparativas, aplicando un nivel de confianza del 95% cuando correspondía.

En el análisis de material particulado, Black Carbon, iones y elementos se aplicó Análisis de Componentes Principales (ACP) y Análisis de Conglomerados (o clúster) con el fin de identificar grupos de datos similares y posibles fuentes de contaminación (aporte antropogénico). Se trata de procedimientos estadísticos frecuentemente utilizados en estudios ambientales (Panda et al. 2006; Lu et al. 2011; Dragovic et al. 2011; Niu et al. 2014; Gabrielli et al. 2008).

IV. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Meteorología

Se analizaron los datos meteorológicos medidos en los glaciares Olivares Alfa y Bello, en adelante sitios monitoreados, junto con los datos meteorológicos de las estaciones Valle Olivares y glaciar Olivares Gamma de la Dirección General de Aguas, en adelante sitios observados, los cuales están emplazados cercanos a los sitios de monitoreo de este estudio. En función de los datos analizados se puede concluir que la zona del glaciar Olivares Gamma presenta una temperatura promedio de $-2,8^\circ\text{C}$, una mínima de $-16,7^\circ\text{C}$ y máxima de $12,3^\circ\text{C}$. Por su parte el glaciar Olivares Alfa presentó una temperatura promedio de $-1,2^\circ\text{C}$, una mínima de $-10,3^\circ\text{C}$ y una máxima de $10,7^\circ\text{C}$ y por su parte Valle

Olivares presentó una temperatura promedio de 3,8 °C, una mínima de -13,9°C y una máxima de 23.2°C, siendo esta la zona más templada respecto a los registros estudiados, y finalmente, el glaciar Bello presentó una temperatura promedio de -8,7 °C, una mínima de -17,9 °C y una máxima de 6,1 °C, siendo este el sitio con las temperaturas más bajas de los sitios monitoreados y observados.

Respecto a la humedad relativa, el glaciar Olivares Gama presentó un promedio de 37,3%, una mínima de 10% y una máxima de 97,6%, a su vez Valle Olivares presentó un promedio de 35.7%, una mínima de 2.9% y una máxima de 98,7%. El glaciar Olivares Alfa en tanto, presentó un promedio de 36,1%, una mínima de 7,9% y una máxima de 78,6%, mientras que el glaciar Bello presentó un promedio de 68.8%, una mínima de 19,3% y una máxima de 93,3%, siendo este sitio el que presenta la mayor humedad relativa en promedio de los sitios monitoreados y observados.

Respecto a las medidas de radiación en los sitios monitoreados, se puede concluir que gracias al cálculo de las diferencias absolutas de los valores registrados, se puede observar que existen diferencias estadísticamente significativas (95% de probabilidad) entre las radiaciones incidentes y reflejada de cada glaciar, considerando los datos de onda corta y de onda larga, respectivamente. Los resultados muestran para radiación solar de (onda corta incidente – reflejada) en el glaciar Bello un valor promedio de 128 watt/m² de diferencia. En tanto, el mismo balance para la onda larga mostró un valor promedio de 50 watt/m² de diferencia. Por otra parte, para la radiación solar de (onda corta incidente – reflejada) del glaciar Olivares Alfa entregó un valor de 63 watt/m² de diferencia, y el mismo balance para la onda larga del mismo glaciar, un valor de 84 watt/m² de diferencia. Al analizar cada glaciar por separado, los resultados dan cuenta que hay diferencias estadísticamente significativas en la tasa de absorción de energía y que esta es propia de cada glaciar, lo que en principio estaría supeditado a las características físicas de su superficie de reflexión, lo cual sin duda condicionaría su capacidad de reflejar la radiación incidente. Con estos resultados es posible observar que la diferencia entre la energía incidente y reflejada sería mayor en el glaciar Olivares Alfa en comparación con el glaciar Bello, lo cual indicaría que el primero de ellos estaría absorbiendo o reteniendo mayor cantidad de energía en su superficie, para ambos tipos de onda. Esto sin duda está condicionado por la presencia de mayor cantidad de agentes o sustancias que absorben o retienen radiación en la superficie del glaciar estudiado. Al calcular albedo para cada glaciar, los resultados muestran un albedo promedio de 0,64 en el glaciar Olivares Alfa y 0,77 para el glaciar Bello. En otras palabras en términos de albedo, el glaciar Bello presenta un valor 17% mayor que el albedo del glaciar Olivares Alfa, diferencia que muy probablemente se deba al tipo de contaminación que está recibiendo este glaciar (Olivares Alfa), afectando directa y negativamente a su albedo. Cuando verificamos estas diferencias de albedo en función de la radiación incidente menos la reflejada para la longitud de onda corta, los resultados indican que el glaciar Bello presenta 2 veces mayor reflexión que el glaciar Olivares Alfa. Cuando realizamos el mismo cálculo para la longitud de onda larga, los resultados indican que el glaciar Bello presenta 1,7 veces mayor reflexión que el glaciar Olivares Alfa.

Respecto a las intensidades y direcciones predominantes de los vientos, el glaciar Gamma, presenta una mayor frecuencia de vientos noreste con velocidades que van desde los 3,6-5,7 m/s en el 40,1% de los vientos registrados y desde los 5,7-8,8 m/s en el 39,3% de los vientos registrados. Para el caso de Valle Olivares, se repite la mayor frecuencia en términos de dirección noreste, de los cuales el 100% presenta intensidades entre 0,5-2,1 m/s, lo cual corresponde a los vientos de menor intensidad registrados en los sitios observados y monitoreados. El glaciar Olivares Alfa en tanto, mostró mayor frecuencia de vientos nornoreste, de los cuales un 33,1% presentó intensidades de 0,5-2,1 m/s y un 27,9% presentó intensidades entre 2,1-3,6 m/s, mostrando un comportamiento similar a Valle Olivares, dado que sus vientos son de baja intensidad. Para el caso del glaciar Bello, este presentó mayor frecuencia de dirección de vientos norte, con intensidades que van desde los 3.6-5.7 m/s en el 27,3% de los vientos registrados y 5,7-8,8 m/s en el 23,9% de los vientos registrados, siendo este último el que presenta mayores intensidades de viento registrada entre los sitios monitoreados.

Material Particulado Atmosférico

La concentración promedio de material particulado atmosférico en el glaciar Olivares Alfa observada para el período completo de monitoreo fue para PM10 1,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con máximos de 44,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que la concentración promedio de PM2,5 fue de 0,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ alcanzando máximos de 6,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Por último la concentración promedio de PM1 fue de 0,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, alcanzando máximos de 2,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La distribución por tamaño de material particulado atmosférico en este glaciar muestra una clara predominancia de partículas finas (0,265–0,615 μm), con valores promedio de 6.948 partículas de 0,265 μm , las cuales logran alcanzar máximos de 32.755 partículas. La concentración promedio de material particulado atmosférico en el glaciar Bello observada para el período completo de monitoreo fue para PM10 de 1,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con máximos de 95,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que la concentración promedio de PM2,5 fue de 0,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ alcanzando máximos de 5,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, por último la concentración promedio de PM1 fue de 0,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ alcanzando máximos de 1,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La distribución por tamaño de material particulado atmosférico en el glaciar Bello muestra una clara predominancia de partículas finas ($0,265 \leq \text{PM} \leq 0,425 \mu\text{m}$), con valores promedio de 4.225 partículas de 0,265 μm las cuales logran alcanzar máximos de 14.115 partículas. El 98% de las partículas observadas en los glaciares Olivares Alfa y Bello corresponden a partículas finas ($\text{MP} \leq 0,425 \mu\text{m}$).

Respecto del origen del material particulado atmosférico encontrado en el glaciar Bello podría explicarse muy probablemente debido a transporte desde una zona geográfica ubicada al nornoroeste de este glaciar, dirección en la cual se encuentra la zona de explotación minera extractiva colindante con el glaciar Olivares Alfa. La concentración de material particulado atmosférico observada en el glaciar Olivares Alfa presenta ciclos marcados de aumento de concentración durante los primeros 6 días de muestreo (del 21 al 26 de Octubre). A partir del séptimo día de muestreo (del 27 al 29 de Octubre) no se observó el mismo fenómeno, produciéndose un decrecimiento de la concentración promedio de

78%, 66% y 61% para la concentración de PM10, PM2,5 y PM1, respectivamente.

Al ser la actividad minera la fuente de emisión de partículas más cercana y visiblemente evidente en la zona estudiada del GOA, sumado al hecho que estas zonas de explotación de mineral están justamente en la dirección del viento predominante del sector durante la campaña de monitoreo, se puede inferir que los ciclos de aumento y disminución de material particulado atmosférico observados en el glaciar Olivares Alfa son muy probablemente producto de la actividad de dichas zonas de explotación.



Figura 2: Fotos aéreas tomadas desde el helicóptero el 21 de octubre 2014 a las 17:45hrs. sobre el rajo, al borde del portezuelo de la montaña del glaciar OA, donde se muestra la nube de PM que genera la actividad industrial extractiva: en (1) vista norponiente desde el glaciar OA, en (2) y (3) aproximación a la parte suroriente de las faenas mineras extractivas y (4) vista superior de faenas mineras extractivas.

Como se puede ver en la figura 2, las fotografías aéreas muestran la nube de PM saliendo del rajo generado por la actividad industrial extractiva por sobre la línea de cumbres, favoreciendo el traslado de las partículas emitidas a lugares aledaños como el glaciar Olivares Alfa.

El material particulado atmosférico emitido permanentemente por la actividad minera extractiva de la zona, muy probablemente permanecería confinado en el rajo de la mina hasta que es capaz de superar la barrera altitudinal que constituye el cordón montañoso que la separa del glaciar Olivares Alfa, permitiendo en condiciones adecuadas de viento y temperatura que las partículas emitidas lleguen hasta éste glaciar. Para comprobar esto se analizaron estas variables meteorológicas, obteniéndose una buena correlación de la ciclicidad del PM con la temperatura, en aquellos momentos en que las partículas llegaban al glaciar. De igual modo el fenómeno de la ciclicidad coincidió

solamente cuando la dirección del viento venía con dirección nor-noreste, específicamente en la misma dirección del rajo de la extracción minera. Por el contrario el fenómeno desapareció, cuando el viento cambió de dirección (este), viniendo desde Argentina, desapareciendo la ciclicidad y disminuyendo en forma importante la concentración de material particulado atmosférico, como ya se describió anteriormente (a partir del 27 al 29 de Octubre).

La concentración de material particulado atmosférico en Santiago presenta ciclos marcados de aumento de concentración durante las mañanas (7:00 a 10:00 h aproximadamente) y durante las tardes (18:00 a 21:00 h) lo que es coincidente con las horas punta del tránsito vehicular diario de la ciudad de Santiago. La distribución por tamaño de material particulado atmosférico en Santiago muestra una clara predominancia de partículas finas (0,265–0,615 μm), con valores promedio de 87.171 partículas de 0,265 μm las cuales logran alcanzar máximos de 603.901 partículas. La concentración promedio de PM10 observada en Santiago es 46 veces mayor a la observada en los glaciares Bello y Olivares Alfa, así mismo la concentración promedio de PM2,5 es 50 y 28 veces superior a la observada en los glaciares Bello y Olivares Alfa respectivamente. Por último la concentración promedio de PM1 observada en Santiago es 48 y 32 veces superior a la observada en los glaciares Bello y Olivares Alfa respectivamente.

La concentración de material particulado atmosférico PM10, PM2,5 y PM1 es significativamente distinta y mayor en la ciudad de Santiago respecto de los glaciares Olivares Alfa y Bello. El análisis factorial realizado a los valores de concentración de material particulado atmosférico sugiere que el origen del MP en ambos glaciares estudiados podría muy probablemente ser común y distinto al de la ciudad de Santiago, esto en conjunto con los datos expuestos anteriormente respecto de la relación del material particulado atmosférico con la meteorología de ambos glaciares, hacen sugerir que una de las fuentes importantes de partículas en ambos glaciares muy probablemente correspondería a la actividad minera contigua al glaciar Olivares Alfa. Las partículas de 0,265 μm presentan proporciones similares en los glaciares Bello y Olivares Alfa (49 y 54% respectivamente), mientras que en Santiago su porcentaje alcanza al 37%, por otro lado las partículas de 0,375 μm representan un 6 y 5% de la fracción fina del material particulado atmosférico encontrada en los glaciares Bello y Olivares Alfa respectivamente, mientras que en la ciudad de Santiago alcanza un 13%. Estas diferencias de distribución permiten inferir que las partículas finas atmosféricas de la ciudad de Santiago muy probablemente son distintas de las partículas finas encontradas en los glaciares Bello y Olivares Alfa, (las cuales serían similares entre los glaciares), lo que constituye otro indicativo de que muy probablemente su origen es común. Las pruebas estadísticas de comparación de medias y de Kolmogorov-Smirnov indicaron que las concentraciones de PM10, PM2,5 y PM1 observadas en el glaciar Olivares Alfa son significativamente distintas y mayores a las observadas en el glaciar Bello. Este comportamiento en la concentración del material particulado atmosférico podría ser explicado por el hecho de que el glaciar Bello se encuentra a mayor distancia (51 Km) que el glaciar Olivares Alfa (5 Km) de la fuente de emisión más cercana probable que se podría encontrar, como es la actividad minera extractiva cordillerana. El número de partículas finas (0,265 μm) observado en

la ciudad de Santiago es 12,6 y 20,8 veces mayor que la medida en los glaciares Olivares Alfa y Bello, respectivamente. El número promedio de partículas finas ($0,265 \mu\text{m}$) observadas en el glaciar Olivares Alfa es 39% superior al glaciar Bello, las partículas de $0,615 \mu\text{m}$ son 52% mayores en el glaciar Olivares Alfa y así en todos los tamaños de partícula medidos, el glaciar Olivares Alfa presenta una mayor cantidad de partículas respecto del glaciar Bello, antecedentes que son coincidentes con el comportamiento de la concentración de material particulado atmosférico y que también podría ser explicado por la mayor distancia del glaciar Bello respecto de la fuente de emisión de partículas más probable y predominante en la zona.

Black Carbon

La concentración de BC medida en el glaciar Olivares Alfa presentó un promedio para el período de monitoreo de 294 ng/m^3 , alcanzando un máximo de concentración de 3.504 ng/m^3 . El BC medido en el glaciar Bello presentó una concentración promedio para el período de monitoreo de 108 ng/m^3 alcanzando un máximo de concentración de 3.867 ng/m^3 . Cuando comparamos esta concentración de BC con sitios prístinos como la estación McMurdo (Antártica) y el monte Sonnblick (Alpes Austríacos) permite presumir que los niveles de concentración promedio de BC observados en el glaciar Bello son más bajos que los sitios de comparación y hay una diferencia estadísticamente significativa y menor que el BC medido en el glaciar Olivares Alfa (294 ng/m^3). Finalmente, la concentración de BC medida en la ciudad de Santiago presentó un promedio para el período de monitoreo de 4.904 ng/m^3 , alcanzando un máximo de concentración de 28.880 ng/m^3 , siendo concordante con concentraciones encontradas en entornos urbanos de grandes ciudades como por ejemplo Viena, o Barcelona. La concentración de Black Carbon observada en el glaciar Olivares Alfa presenta marcados ciclos diarios de aumento de concentración a partir de aproximadamente las 11 de la mañana hasta las 22 h durante los primeros 6 días de muestreo. Estos ciclos de aumento de concentración son coincidentes con los ciclos de aumento de concentración de material particulado atmosférico medidos en el mismo glaciar y durante el mismo período de tiempo.

Durante el monitoreo en el glaciar Olivares Alfa comprendido entre el 21 y 26 de Octubre, período en el cual se observaron los ciclos de aumento y disminución de BC y material particulado atmosférico, el viento predominante proviene desde la dirección nor-noreste, coincidiendo con la dirección donde se encuentra la actividad minera extractiva de la zona (aproximadamente a 5 Km en dirección noroeste), mientras que en el período comprendido entre el 27 y 29 de Octubre, la dirección del viento cambia proviniendo mayoritariamente del este, lo cual es coincidente con la desaparición de los ciclos de aumento y disminución de la concentración de BC y material particulado atmosférico medido en la estación de monitoreo instalada en el glaciar Olivares Alfa. Existe una correlación significativa ($R^2 > 0,6$) entre BC y partículas hasta $0,615 \mu\text{m}$ en el glaciar Olivares Alfa, sobre este tamaño de partículas, la correlación con BC disminuye, indicando que el Black Carbon observado en el glaciar Olivares Alfa está asociado a partículas finas. Este hecho es un indicativo de que las fuentes

de BC corresponden a fuentes de combustión, lo que sumado a que tanto BC como partículas provendrían muy probablemente de la misma fuente (actividad minera extractiva) hace presumible que el BC observado en el glaciar Olivares Alfa pudiese ser producido por la maquinaria que utiliza motores de combustión interna en la faena minera. Los análisis estadísticos de significancia indican que la concentración de BC observada en el glaciar Olivares Alfa es significativamente distinta y mayor a la observada en el glaciar Bello. Los resultados obtenidos en el análisis factorial permiten indicar que muy probablemente el Black Carbon (BC) observado en el glaciar Bello tendría un origen distinto al del material particulado atmosférico observado en el mismo glaciar. Por otra parte y dado que el BC del glaciar Bello tampoco se agrupa con el BC del glaciar Olivares Alfa en el análisis de conglomerados, es posible inferir que el BC observado en el glaciar Bello muy probablemente no provendría de la misma fuente identificada en el glaciar Olivares Alfa o al menos no en su totalidad. No existe correlación significativa ($>0,6$) entre BC y partículas finas en el glaciar Bello, indicando que el Black Carbon observado no está asociado al material particulado atmosférico medido en dicho glaciar y corroborando los resultados observados en el análisis factorial antes mencionado.

La concentración de BC medido en la ciudad de Santiago experimenta una ciclicidad diaria acorde a la observada en otras zonas urbanas del mundo, donde se produce una correlación y asociación directa con el material particulado emitido por fuentes de combustión comunes a estos dos contaminantes atmosféricos, destacando principalmente las fuente móviles, seguidas de las fijas. Las distribuciones de concentración de BC son distintas en los 3 sitios estudiados, por lo tanto se puede decir que la concentración de BC observada en Santiago es significativamente distinta y mayor que la observada en el glaciar Olivares Alfa, la cual a su vez es significativamente distinta y mayor a la concentración de BC observada en el glaciar Bello.

Para el BC medido en la ciudad de Santiago, existe una correlación significativa ($>0,6$) entre BC y partículas sólo en el tamaño más fino capaz de medir con nuestro instrumento ($0,265 \mu\text{m}$). A medida que aumentamos de tamaño de partículas atmosféricas, la correlación con BC disminuye, indicando que el Black Carbon observado en Santiago está asociado principalmente a partículas ultrafinas. Este hecho es un indicativo de que las fuentes de BC corresponden a fuentes de combustión principalmente de combustibles fósiles, lo que en Santiago puede ser atribuible fundamentalmente al parque vehicular de la ciudad. El análisis multivariados de componentes principales indica que la concentración de BC de los 3 sitios estudiados (Santiago, glaciar Bello y glaciar Olivares Alfa) tiene una distribución distinta por lo que se puede inferir que deberían tener muy probablemente distintos orígenes.

pH, CE y iones

En el glaciar Bello los valores de pH registrados en muestras de nieve superficial estuvieron enmarcados en un rango comprendido entre 7,46 y 8,02, con un promedio de $7,82 \pm 0,28$. En el glaciar Olivares Alfa los valores de pH registrados en muestras de nieve superficial estuvieron comprendidos en un rango entre 7,75 y 8,32, presentando un promedio de $8,06 \pm 0,41$. Entre los 2

glaciares en estudio, no existiría diferencia estadísticamente significativa en los valores de pH promedios obtenidos. De acuerdo a los valores de pH registrados en los glaciares en estudio, se puede inferir que ellos no estarían influenciados por deposiciones atmosféricas ácidas y/o se estarían produciendo fenómenos de neutralización directamente en la atmósfera o en el proceso de deposición que neutralizarían el valor del pH, llevándolo a niveles básicos como los encontrados. Esto implica la presencia de iones neutralizantes en la atmósfera de estos glaciares que estarían generando este valor final de pH en la nieve.

Los valores de CE observados en el glaciar Bello (GB) en muestras de nieve superficial, estuvieron en un rango comprendido entre 3,0 y 7,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$, presentando un promedio de $5,2 \pm 2,74$. Los valores de CE observados en el glaciar Olivares Alfa (GOA) registrados en muestras de nieve superficial estuvieron en un rango comprendido entre 8,8 y 14,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$, presentando un promedio de $11,2 \pm 0,41$. A pesar de que el valor promedio de la CE en el GOA es prácticamente el doble del medido en el GB, entre los 2 glaciares en estudio, no existen diferencias estadísticamente significativas en los valores de CE. Las concentraciones promedio de los aniones en muestras de nieve superficial recolectadas en el glaciar Bello, variaron en el siguiente orden decreciente: NO_3^- (14,87 $\mu\text{Eq}/\text{L}$), Cl^- (13,30 $\mu\text{Eq}/\text{L}$) y finalmente SO_4^{2-} (6,88 $\mu\text{Eq}/\text{L}$). Los cationes variaron en el siguiente orden decreciente: Ca^{2+} (44,88 $\mu\text{Eq}/\text{L}$), NH_4^+ (3,82 $\mu\text{Eq}/\text{L}$), Mg^{2+} (1,61 $\mu\text{Eq}/\text{L}$), K^+ (1,45 $\mu\text{Eq}/\text{L}$) y finalmente Na^+ (1,28 $\mu\text{Eq}/\text{L}$). Las concentraciones promedio de los aniones en muestras de nieve superficial recolectadas en el glaciar Olivares Alfa, variaron en el siguiente orden decreciente: SO_4^{2-} (8,70 $\mu\text{Eq}/\text{L}$), NO_3^- (8,26 $\mu\text{Eq}/\text{L}$), Cl^- (7,42 $\mu\text{Eq}/\text{L}$). Los cationes variaron en el siguiente orden decreciente: Ca^{2+} (11,85 $\mu\text{Eq}/\text{L}$), NH_4^+ (6,97 $\mu\text{Eq}/\text{L}$), Na^+ (2,80 $\mu\text{Eq}/\text{L}$), Mg^{2+} (2,07 $\mu\text{Eq}/\text{L}$), y finalmente K^+ (1,06 $\mu\text{Eq}/\text{L}$).

Entre los 2 glaciares en estudio, se encontró diferencia estadísticamente significativa en las concentraciones promedio, en nieve superficial para los iones NO_3^- , SO_4^{2-} , Na^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} . En el glaciar Bello y Olivares Alfa, el ion Ca^{2+} es el principal agente neutralizante, lo que podría sugerir la presencia de iones alcalinos tales como carbonatos presentes en la atmósfera y/o en la deposición seca y/o húmeda, los que estarían actuando como agentes neutralizantes, produciendo un aumento de la basicidad de la nieve. El cálculo de los factores de enriquecimiento para los iones mayoritarios en ambos glaciares estudiados, señalan que estos se encuentran desde moderadamente enriquecido a extremadamente enriquecido en los iones estudiados, lo que indicaría que en el glaciar Bello y Olivares Alfa los iones son aportados por una fuente distinta a los aerosoles marinos u otra fuente natural como el suelo o muy probablemente polvo natural resuspendido por el viento. En ambos glaciares estudiados, el ion más enriquecido corresponde a Ca^{2+} . En el caso del glaciar Bello le sigue el K^+ y SO_4^{2-} en orden decreciente de enriquecimiento. En el glaciar Olivares Alfa le sigue SO_4^{2-} y K^+ en orden decreciente. El sulfato no marino (SNM), corresponde a más de un 80% del total del SO_4^{2-} determinado en ambos glaciares estudiados, indicando que hay una importante fuente de sulfato que no proviene de esta fuente natural en estos glaciares. El cociente SNM/SM para el GOA es 2,6 veces mayor que el obtenido en el GB, indicando nuevamente la fuerte presencia de sulfato proveniente de un origen distinto del natural en este glaciar. Estas fuentes de SNM para el GOA podrían ser naturales y/o

antropogénicas, respecto de esta última se podrían mencionar como probables fuentes: el SO_2 producido por la combustión de combustibles fósiles generado en la actividad propia de extracción minera en la zona de estudio, o incluso la contribución de SO_2 proveniente de fundiciones metalúrgicas instalada en las inmediaciones de la Región Metropolitana y cerca también de la ciudad de Santiago.

El análisis de componentes principales y jerárquicos (dendrograma), junto con la matriz de correlación de Pearson para las muestras de nieve superficial realizado para ambos glaciares indican para el glaciar Olivares Alfa una agrupación constituida por Cl^- , Na^+ y K^+ , los cuales pueden ser atribuidos a aerosoles marinos de origen natural. Un segundo grupo constituido por SO_4^{2-} y Mg^{2+} , donde SO_4^{2-} suele ser atribuido a fuentes antropogénicas, como las emisiones producto de la combustión de combustibles fósiles, quema de biomasa y carbón, fundiciones de cobre o industrias pirometalúrgicas. Un tercer grupo conformado solo por NH_4^+ , y un último grupo formado por NO_3^- y Ca^{2+} , donde NO_3^- y NH_4^+ suelen ser atribuidos a fuentes antropogénicas, donde se incluyen las emisiones producto de la combustión de combustibles fósiles y quema de biomasa, emisiones de plantales de producción ganadera y fertilizantes naturales como artificiales. Finalmente, Mg^{2+} y Ca^{2+} se asocian a un origen principalmente natural crustal, proveniente muy probablemente de polvo natural resuspendido por el viento. En análisis anterior para el glaciar Bello genera dos agrupaciones, el primero constituido por NH_4^+ y el segundo constituido por el resto de los aniones y cationes: Cl^- , SO_4^{2-} , K^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} , Na^+ y NO_3^- . De ellos, los iones Cl^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} pueden ser atribuidos a fuentes naturales, donde los 3 primeros son mayoritariamente representativos de fuentes cuyo origen serían muy probablemente los aerosoles marinos y los dos últimos tienen un origen principalmente crustal, provenientes muy probablemente de polvo natural resuspendido por el viento. Por otra parte los iones SO_4^{2-} , NH_4^+ y NO_3^- suelen ser atribuidos a fuentes antropogénicas, donde se incluyen las emisiones producto de la combustión de combustibles fósiles y quema de biomasa, emisiones de plantales de producción ganadera y fertilizantes naturales como artificiales.

Se calculó la correlación existente entre los valores del balance iónico (ΔC) para cada pozo de nieve realizado en cada uno de los glaciares estudiados y se correlacionó con la concentración de calcio (Ca^{2+}). La correlación obtenida para ambos glaciares fue buena ($>0,64$ GOA y $>0,76$ GB). Por lo que se puede inferir la presencia de carbonato/bicarbonato en la nieve, dando cuenta de que esta sería la especie química predominante en términos del equilibrio químico que determina el pH de la nieve, lo que se condice directamente con el hecho de haber encontrado para ambos glaciares que el factor de neutralización mayor es para el ion Ca^{2+} quien es el contra ion positivo de las especies de carbonato/bicarbonato en la nieve y quien estaría basificando el valor de pH en este hidrometeoro. El análisis fisicoquímico de los iones distribuidos en la calicata de nieve profunda (snow pit) realizadas en este estudio presenta una gran variabilidad en la concentración tanto de aniones como de cationes, la cual se puede explicar por distintos fenómenos como son los procesos de infiltración, fusión, congelamiento y recongelamiento, así como la percolación que afectan en mayor o menor medida a los distintos iones según sus características

fisicoquímicas. En este estudio se pudo observar que las calicatas realizadas en ambos glaciares presentan un comportamiento muy similar al descrito en la literatura, con una gran movilidad de SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Na^+ , NO_3^- , Cl^- , K^+ y Mg^{2+} , con la excepción de NH_4^+ quien manifiesta una gran presencia en los distintos horizontes de las calicatas estudiadas. Una posible explicación para esto último, podría ser las cercanías de estos glaciares con zonas agrícolas donde la aplicación de fertilizantes naturales y/o artificiales, junto con otras actividades agropecuarias aportan NH_4^+ en forma permanente durante todo el año. Esto produciría una deposición también permanente en los perfiles de nieve que se van acumulando, dejando estos iones NH_4^+ atrapados en cada horizonte, aspecto que se ve reflejado en las altas y variables concentraciones de NH_4^+ presentes en este estudio y en ambos glaciares. Por otra parte la correlación existente entre NH_4^+ , SO_4^{2-} y NO_3^- , en la nieve superficial, como en calicata encontrada en los sitios de monitoreo, hace presumir que todos estos iones tendrían un origen antropogénico, tal como se ha explicado anteriormente, reafirmando el origen antrópico del ion NH_4^+ . Finalmente, en el estudio del comportamiento fisicoquímico de los iones distribuidos en la calicata de nieve profunda (snow pit) realizados tanto para el GB como para el GOA se puede observar lo siguiente: Buena correlación ($>0,5$) existente entre la concentración de Ca^{2+} y SO_4^{2-} , lo cual estaría de acuerdo con la especie postulada de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, como responsable de la concentración de estos iones en la nieve.

Que mayoritariamente la variación del pH a través de la calicata es dependiente de la variación de la concentración de Ca^{2+} (ion neutralizador).

Que existe una baja correlación ($R^2=0,1$) entre la concentración de SO_4^{2-} y el pH, dando cuenta este anión no está asociado con el pH de los distintos estratos de la calicata, o que ha sido neutralizado por el ion Ca^{2+} como se explicó en el punto anterior.

Que la variación de la conductividad eléctrica (CE) respecto de la concentración total de iones presenta una correlación R^2 mayor a 0,5, lo que indica una buena concordancia entre la CE y la carga iónica de cada estrato de la calicata, como debiera esperarse.

Que se puede observar una buena correlación ($> 0,93$) entre la concentración total de aniones y la concentración total de cationes, lo que está de acuerdo al principio de electroneutralidad, en donde debiera esperarse una concentración aproximadamente igual entre aniones y cationes, aspecto que además valida la calidad de los análisis, como ocurre en este estudio.

Elementos

En la nieve superficial y profunda de cada Glaciar se determinó la concentración de los elementos traza definidos en el estudio; aluminio (Al), hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn), arsénico (As), cadmio (Cd), plomo (Pb), mercurio (Hg), cromo (Cr) y antimonio (Sb).

Glaciar Bello

Los resultados para la concentración de Cu observada en nieve superficial en el glaciar Bello muestran que es 1,3 veces menor que la encontrada en nieve superficial en la Antártica y 190 veces menor que la observada en el monte Everest; sin embargo la concentración de Zn en el glaciar Bello es 18 veces superior a la Antártica y 145 veces menor que el monte Everest. Esto indica que si bien los niveles de concentración de los demás elementos observados en nieve superficial en el glaciar Bello son comparables para algunos elementos a la concentración encontrada en sitios remotos como la Antártica, de todas formas existe presencia de elementos contaminantes.

El cálculo de los Factores de enriquecimiento de elementos traza en nieve superficial indica que Cu, Zn y Hg se encuentran altamente enriquecidos en nieve superficial, indicando una fuerte influencia antropogénica en la concentración de estos elementos en el glaciar Bello. Por otro lado, As se encuentra moderadamente enriquecido y Fe no se encuentra enriquecido, indicando que este último es de origen mayoritariamente crustal.

La concentración promedio de elementos traza varía heterogéneamente en profundidad en las calicatas realizadas en el glaciar Bello, dando cuenta de su movilidad a través del snow pack.

Se calculó la tasa de deposición de elementos anual de cada elemento asumiendo que el total de la calicata corresponde a la nieve caída y acumulada durante un año. Según esto, la tasa de deposición de Cu en el glaciar Bello es 1,4 veces mayor que aquella encontrada en glaciares como Nakanoto (Deposición Húmeda) y 3,6 veces mayor que Reston (Deposición Húmeda), ambos sitios de comparación son considerados como background, por lo que se podría decir que la deposición de Cu en el glaciar Bello podría ser considerada como contaminación. La misma situación se presenta para Fe y Al, cuyas tasas de deposición son 7,8 y 3,2 veces mayores que Reston. Sin embargo las tasas de deposición de Zn y Pb son menores a las observadas en los mismos sitios background de comparación, por lo que las tasas de deposición de estos últimos elementos observadas en el glaciar Bello podrían ser consideradas como naturales.

El cálculo de los Factores de Enriquecimiento de elementos traza en nieve profunda (calicata) del glaciar Bello indican que Cu, Zn, As, Pb y Hg se encuentran moderadamente enriquecidos, mientras que Cd, Fe y Al no se encuentran enriquecidos.

El análisis de conglomerados realizado a los valores de concentración de elementos traza en nieve profunda del glaciar Bello, agrupa los elementos en 2 clúster, el primero agrupa Cd, Cu, As, Fe y Al, elementos que tienen origen antropogénico y crustal. El segundo clúster asocia Zn y Pb indicando que su origen es común y muy probablemente provienen de actividades de tipo antropogénicas.

Glaciar Olivares Alfa

La concentración de todos los elementos estudiados en nieve superficial es significativamente distinta y superior en el glaciar Olivares Alfa respecto del

glaciar Bello, por ejemplo, la concentración de Cu y As en nieve superficial del glaciar Olivares Alfa es 194 y 88 veces superior a la del glaciar Bello respectivamente.

El cálculo de los Factores de Enriquecimiento de elementos traza en nieve superficial del glaciar Olivares Alfa indica que Cu, As y Sb se encuentran altamente enriquecidos, indicando una fuerte influencia antropogénica en la concentración de estos elementos en el glaciar Olivares Alfa. Por otro lado, Zn, Pb y Hg se encuentran moderadamente enriquecidos y Fe no se encuentra enriquecido, indicando que sería muy probablemente de origen mayoritariamente crustal.

De todas formas, al calcular los FE de elementos traza en nieve superficial en el glaciar Olivares Alfa se puede afirmar que existe una fuerte influencia de tipo antropogénica sobre la concentración de Cu, As y Sb, este antecedente, junto con las mediciones de Iones, Material Particulado y Black Carbon, complementados con los análisis de los datos meteorológicos del sector, permiten inferir que la fuente de contaminación que está afectando al glaciar Olivares Alfa correspondería muy probablemente a la actividad minera extractiva cercana a éste.

La concentración de elementos traza varía heterogéneamente en profundidad en las calicatas realizadas en el glaciar Olivares Alfa, dando cuenta de su movilidad a través del snow pack.

Al igual que en el GB, se calculó tasa de deposición de elementos anual de cada elemento para el GOA asumiendo que el total de la calicata corresponde a la nieve caída y acumulada durante un año. Según esto, la tasa de deposición de Cu en el glaciar Olivares Alfa es 5,0 veces mayor que en el glaciar Bello, así como Cu, el resto de los elementos a excepción de As, Fe y Al, presentaron tasas de deposición mayores en el glaciar Olivares Alfa respecto del glaciar Bello.

La concentración de Cu, Cr, Zn, Pb, Hg y Sb es significativamente distinta y mayor en el glaciar Olivares Alfa respecto del glaciar Bello. La concentración de As no presentó diferencias significativas entre ambos glaciares, mientras que la concentración de Fe y Al es significativamente distinta y menor en el glaciar Olivares Alfa, respecto del glaciar Bello. De la misma manera, los resultados del cálculo de los Factores de Enriquecimiento indican una fuerte influencia antropogénica para Cu, Zn, As, Cd, Sb y Hg en el glaciar Olivares Alfa, todos estos elementos asociados habitualmente a actividades mineras.

El análisis de conglomerados realizado a la concentración de elementos medidos en calicatas (snow pit) realizadas en el glaciar Olivares Alfa, agrupa los elementos en 2 clúster, el primero agrupa Cu, Sb, As, Fe y Al, elementos que tienen origen antropogénico y crustal. El segundo clúster asocia Zn, Hg y Pb indicando que su origen es común y muy probablemente provienen de actividades antropogénicas. Por último Cr y Cd se asocian en un clúster aparte, no pudiéndose determinar su origen utilizando esta herramienta estadística.

Ciudad de Santiago

El análisis de elementos traza realizado a las muestras de material particulado atmosférico de la ciudad de Santiago indica que Sb es el elemento de mayor concentración (374,99 ng/m³), seguido de Cu, Fe y Zn. Antimonio (Sb) es un metaloide que ha sido asociado a emisiones producidas por el tráfico vehicular, lo que explica su alta concentración urbana, debido al hecho de que la estación de monitoreo de Parque O´Higgins se encuentra contigua a una importante carretera con alto flujo vehicular.

Al analizar las distribuciones de elementos en los sitios de estudio, se observa claramente que en la ciudad de Santiago Sb es predominante (45%) por sobre el resto de los elementos determinados, le siguen Cu (31%) y Zn (16%). Esta distribución es distinta a la observada en el glaciar Bello donde Zn es el elemento mayoritario (59%) seguido de Cu (30%) y Cr (7%). Por otra parte en el glaciar Olivares Alfa, Cu es el elemento mayoritario (86%) dando cuenta de su cercanía a la fuente de emisión, seguido de Zn (9%). El análisis de las distribuciones de elementos en los 3 sitios de estudio da cuenta de que son distintos entre sí, sin embargo no se puede descartar la influencia de la actividad minera cordillerana proveniente de las cercanías del Glaciar Olivares Alfa, sobre el glaciar Bello debido a los antecedentes de dirección de viento, albedo, iones y concentración de partículas, que si indican una relación con esta fuente de emisión en cordillera.