

Dinámica de la contribución glaciar a la cuenca alta del río Yeso durante el periodo de ablación 2017/2018

Dynamics of the glacial contribution to the upper Yeso river basin during the period of ablation 2017/2018

Quevedo-Tejada, D.^{1*}, Landeros, E.¹, Olivares, D.¹, McPhee, J.², Caro, A.², Berroeta, C.³, Poblete, C.³, Reyes, J.³, Fleege, H.⁴, Carvallo, J.⁵, Fuentes, J.⁴

Recibido: 15/08/2019

Aceptado: 19/09/2019

*Autor de correspondencia



Resumen

El abastecimiento de agua potable es uno de los mayores desafíos que presentan las ciudades en el mundo. Si bien en Chile se ha logrado una cobertura de agua potable urbana del 100%, la garantía del suministro futuro requiere estudios constantes del estado y evolución de las distintas fuentes de abastecimiento. En el caso de Santiago, el abastecimiento de agua depende principalmente de la cuenca alta del río Maipo y la existencia de más de 700 glaciares, lo que hace necesario entender de mejor manera los procesos hidrológicos y considerar los efectos del cambio climático sobre la cuenca. En particular, los aportes glaciares a la hidrología a nivel de cuenca son poco conocidos, a pesar de representar un almacenamiento natural de agua que contribuye a la demanda en los meses de máximo consumo. En este contexto, este trabajo se orientó al estudio de cuatro glaciares de diferente tipo (descubiertos, cubiertos y rocoso) durante el período de ablación 2017-2018, realizando mediciones de variables meteorológicas, hidrológicas y glaciológicas relevantes en la cuenca alta del río Yeso, donde se ubica el embalse El Yeso, principal fuente reguladora de almacenamiento para el abastecimiento. Los principales resultados cuantifican el aporte glaciar durante el período de deshielo, en un 41%, donde el glaciar cubierto Pirámide aportó cerca del 56% del total del aporte glaciar. Estos resultados fueron confirmados y complementados por el análisis fluviométrico e isotópico, indicando que entre el 20 y 60% del aporte proviene de aguas con interacción con unidades geológicas, es decir, los glaciares rocosos o cubiertos, las cuales infiltran y luego afloran aguas abajo. Los resultados muestran la diferencia en la dinámica del aporte glaciar según su tipología, así como también su rol de embalse natural, proveyendo de agua durante toda la etapa de ablación, durante el período de máxima demanda para el consumo humano y agrícola.

Palabras clave: oferta hídrica, aporte escorrentía glaciar, río Yeso.

Abstract

The supply of drinking water is one of the greatest challenges for cities in the world. Although Chile has accomplished the goal of 100% urban drinking water coverage, to ensure future supply requires a continuous updating of knowledge about the actual and future situation of water supply sources. In Santiago, water supply depends mainly on the Upper Maipo River Basin and its more than 700 glaciers. This context makes it necessary for a better understanding of hydrological processes and impacts of Climate Change on the basin. In particular, glacial contribution to hydrology at the basin level are less known than other contributions, besides it represents a natural reservoir that supply water in the months of greatest demand. In this context, this study was focused on the analysis of four glaciers of different types (uncovered, covered and rock glaciers) during the period of ablation 2017-2018, measuring relevant meteorological, hydrological and glaciological variables in the Upper Yeso river Basin, where is located the El Yeso reservoir, the main source of storage for supply. The results obtained in the study allows to estimate the glacier contribution among the melting season, during the observed period around 41% of the streamflow comes from ice melting, and the largest contributor was glacier Piramide (nearly 56% of the total glacier contribution). These results were confirmed and complemented by fluviometric and isotopic analysis, which indicated among 20 and 60% of streamflow correspond to sources with interaction with geological units, related to rock or debris covered glaciers. The results show the difference of glacier contribution according to its typology, as well as its role as a natural reservoir, providing water during the entire melting season, coincident with the maximum water demand for human and agricultural uses.

Keywords: water supply, glacial runoff contribution, Yeso River.

1 Corporación Chilena de Investigación del Agua, Santiago-Chile, diana.quevedo@cetaqua.com, elanderos@cetaqua.com, dolivaresme@cetaqua.com

2 Universidad de Chile, Fundación para la Transferencia Tecnológica, jmcphoe@u.uchile.cl, alexis.caro@amtc.cl

3 Aguas Andinas, Dirección Desarrollo Sustentable, y Dirección de Gestión del Servicio, cberroeta@aguasandinas.cl, cpoblete@aguasandinas.cl, jreyesa@aguasandinas.cl

4 Sociedad del Canal de Maipo, jfuentes@scmaipo.cl

5 Junta de Vigilancia de la 1ª Sección del Río Maipo, harryfleege@hotmail.com

1. INTRODUCCIÓN

El abastecimiento de agua potable de la población es uno de los mayores desafíos que presentan las ciudades en el mundo, lo que ha motivado a las Naciones Unidas a considerarlo como uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS5). Si bien Chile ha logrado una cobertura de agua potable urbana del 100%, la garantía del suministro a medio y largo plazo requiere un estudio constante del comportamiento actual y futuro de las distintas fuentes de abastecimiento.

En el caso de Santiago de Chile, con una población de más de 7 millones de habitantes y cuyo abastecimiento de agua depende principalmente de la cuenca alta del Río Maipo, se hace necesario entender de mejor manera los ciclos hidrológicos y considerar los potenciales impactos del cambio climático sobre la cuenca.

Dentro de las características relevantes de la cuenca se encuentra la existencia de 768 glaciares, de acuerdo al catastro vigente de la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas, cuya dinámica de aporte glaciar a la hidrología a nivel de cuenca es poco conocida, y que representa un almacenamiento natural de agua que precisamente contribuye a suplir la demanda en los meses de máximo consumo, entre diciembre a marzo.

A nivel global, cerca de 500 glaciares en diversas regiones del mundo han sido monitoreados desde 1894 (WGMS, 2008), transformándose en objeto de estudio en la medida que sus retrocesos generan impactos severos a nivel ambiental y humano, principalmente en su rol de prestadores de servicios ecosistémicos y reservorios de agua para abastecimiento humano. Como resultado del análisis de estas mediciones, se ha observado que la tasa de derretimiento glaciar a nivel mundial y en particular en la cordillera de Los Andes ha incrementado considerablemente desde 1960 (Vaughan *et al.*, 2013), evidenciándose tasas de retroceso anual de longitud glaciar de hasta 125 m entre 1961 y 2011 (Rivera *et al.*, 2012). Estas tasas de derretimiento han impactado directamente en la hidrología glaciar, alterando la temporalidad y magnitud de los

caudales y perdiendo su capacidad de almacenamiento de agua.

Así mismo, el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático en su Quinto Reporte (AR5) ha puesto de manifiesto en sus proyecciones de los escenarios RCP 2.6 y 8.5 en la zona central de Chile (2081-2100), aumentos de temperatura entre 0.5 y 1.5°C, con reducciones en la precipitación promedio anual entre un 5 y 15%, incremento de la elevación de la isoterma 0°C con la consiguiente reducción de los caudales medios mensuales provenientes de glaciar (Vaughan *et al.*, 2013).

En la actualidad, la Dirección General de Aguas del Gobierno de Chile, DGA, advierte que la supervivencia de glaciares pequeños está en riesgo, ya que, de mantenerse el aumento de temperatura y el descenso de precipitación, estos desaparecerían en el corto plazo, es decir entre 15 y 20 años (Nota de prensa, El Mercurio 12/mayo/2019).

1.1 Inventarios de glaciares en Chile

Actualmente, la DGA, trabaja en la actualización del inventario de glaciares para todo el país. A nivel de la cuenca del río Maipo, la DGA ha llevado a cabo dos inventarios de glaciares con el objetivo de levantar información sobre las principales características físicas de los glaciares. El primer inventario, desarrollado por Cedomir Marangunić en 1979, se focalizó en la cuenca del río Maipo, empleando como información base fotografías aéreas del vuelo HYCON (1955-56) complementadas por la cartografía desarrollada por Louis Lliboutry en 1956, y fotografías recientes de excursiones a altas cumbres (DGA, 1979). El segundo inventario de glaciares desarrollado por DGA en 2011, contempló como área de estudio la zona central de Chile. En su desarrollo se utilizaron imágenes satelitales del sensor ETM+ de los años 2000 y 2001, imágenes Spot 5 extraídas de la aplicación Arc2Earth, fotografías aéreas SAF 1:50.000 de 1996-2002 y un modelo digital de elevación ASTER GDEM (DGA, 2011a; 2011b). En este sentido, ambos catastros presentan un gran desfase entre la información base empleada para su análisis y su fecha de publicación; así mismo, presentan diferencias en el tipo de información empleada y las metodologías de

procesamiento, con lo cual su comparación debe hacerse teniendo en cuenta dichos aspectos. En la tabla 1, se presenta un resumen comparativo entre los inventarios de 1979 y 2011 para la cuenca del río Maipo. Respecto del número total de glaciares, el catastro de 1979 contabilizó un total de 647 glaciares, mientras que en 2011 este número ascendió a 768, principalmente con las mejoras en la identificación de los glaciares rocosos cuyo número pasó de 326 en 1979 a 538 en 2011. El área glaciar total estimada

disminuyó de 421.9 km² en 1979 a 372.72 km² en 2011; esta diferencia puede atribuirse principalmente a la información fuente empleada y a los métodos de estimación. Un aspecto importante objeto de estudio, ha sido la cuantificación del aporte glaciar a la escorrentía del río Maipo, lo cual resulta indispensable al momento de analizar la disponibilidad actual y proyectada de los recursos hídricos afluentes a la ciudad de Santiago, especialmente para consumo humano.

Tabla 1. Cuadro comparativo entre los inventarios de glaciares de 1979 y 2011 para la cuenca del río Maipo. Fuente: adaptado DGA (2011a; 2011b).

Inventario	Total glaciares	Nº glaciares rocosos	Área total km ²	Área glaciar descubierto km ²	Área glaciares cubiertos y rocosos km ²	Elevación mínima msnm	Elevación máxima msnm
1979	647	326	421.9	257.1	164.7	3,730	4,203
2011	768	538	372.72*	204.5	Cubierto = 26.2 Rocoso = 142.02	3,646	4,031

*El valor de área total glaciar para el inventario de 2011 registrado en el Informe técnico DGA (2011a) es de 371.24 km², mientras que el cuantificado a partir de los datos brutos contenidos en los Anexos (DGA, 2011b) del mismo estudio es de 372.72 km². Esta diferencia puede deberse al proceso de digitación y redondeo de los datos.

Además de su magnitud, ha resultado interesante su variación según el tipo de año hidrológico (Muy húmedo, húmedo, normal, seco, muy seco). De acuerdo con Castillo (2015) en años secos el caudal proveniente del derretimiento de glaciares puede constituir hasta un 81% del caudal total de verano, un 44% y un 21% del caudal total en años secos y húmedos respectivamente. Mientras que Ayala *et al.*, (2016) concluyó que durante años secos la contribución glaciar a la escorrentía corresponde

a un 42+/-8% y 67+/-6% del caudal anual y el de verano respectivamente. Por su parte, Peña y Nazarala (1987) indican que en el año hidrológico más seco registrado en la cuenca (1968/69), el aporte glaciar de acuerdo a su metodología fue aproximadamente del 67% de la descarga mensual registrada en este verano, mientras que para el período 1985/86 que fue un año seco, este aporte es tan solo de 24.3% (tabla 2).

Tabla 2. Aporte glaciar al caudal promedio anual y caudal promedio de verano estimado por Peña y Nazarala (1987), Castillo (2015) y Ayala *et al.*, (2016).

Estudio	Estación	Tipo año hidrológico	Periodo	Aporte en verano (%)	Aporte en anual (%)
Peña & Nazarala (1987)	Río Maipo en El Manzano	Normal	1984/85	11,3	6,8
		Seco	1985/86	24,3	16,8
Castillo (2015)	Río Maipo en El Manzano	Normal		42	25
		Seco	1984/15	48	27
		Muy seco		81	45
Ayala <i>et al.</i> (2016)	AWS en cuenca río Yeso	Normal	2013/14	30	10
		Muy seco	2014/15	67	42

Lo anterior, marca una fuerte dependencia del aporte glaciar en función del año hidrológico. Situación a tener en cuenta, si se considera el hecho de que a 2018, cerca del 90% de la población de la ciudad de Santiago se abastece de agua potable de la cuenca alta del río Maipo (estimaciones propias), contando para esto con reservas hídricas como el Embalse El Yeso (220 millones m³), principal almacenamiento regulado de la cuenca para consumo humano y agrícola, además de la laguna Negra (600 millones m³) y la laguna Lo Encañado (50 millones m³), ubicadas en la cuenca alta del río Yeso, afluente del río Maipo. En la cuenca del río Yeso, con un área de 627 km², se encuentran cerca de 94 glaciares de los cuales 63 son rocosos y 16 son descubiertos, los cuales representan un 6.2% del área total de la cuenca del río Yeso y el 12% del total de glaciares presentes en la cuenca alta del río Maipo (Aguas Andinas, 2018).

Bajo este contexto de cambios de la disponibilidad hídrica debido a futuras y actuales alteraciones en la precipitación y la temperatura en términos de cantidad, calidad y temporalidad, la creciente necesidad de garantizar la Seguridad Hídrica en diversos ámbitos, entre ellos el acceso oportuno y permanente a agua potable, y su dependencia de los glaciares como fuente de suministro, es relevante profundizar en el conocimiento de la dinámica del aporte glaciar actual y futura como una herramienta para desarrollar estrategias de gestión del recurso hídricos y establecimiento de medidas de mitigación y adaptación al cambio climático que aseguren el abastecimiento de la demanda en un contexto de sostenibilidad.

En este sentido, el presente documento tiene como objetivo evaluar la dinámica de la escorrentía proveniente de glaciares en la cuenca alta del río Yeso para el periodo de ablación 2017/18, mediante el análisis de datos tomados en terreno y la modelación hidroglaciológica.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio

La cuenca alta río Yeso se localiza en el sector oriente de la cuenca alta del río Maipo, aguas arriba del embalse El Yeso, donde el nacimiento

del río principal es producto del derretimiento glaciar de la cuenca alta, definiéndose de forma más clara como curso fluvial en el sector Termas del Plomo TP (-33,56°N -69,91°O), donde convergen los caudales de deshielo de los glaciares Bello, Yeso y Pirámide. En el sector de Termas del Plomo se considerará el cierre de la cuenca en estudio (figura 1).

La cuenca del río Yeso en TP posee una extensión de alrededor 59.9 km², con un rango de elevación aproximado entre los 3,015-5,500 msnm. El número total de glaciares contenidos en esta cuenca es de 10, donde los dos glaciares descubiertos, denominados glaciar Bello (4.1 km²) y Yeso (2.2 km²), el glaciar cubierto por detritos, glaciar Pirámide (4.4 km²), y un glaciar rocoso denominado D-073 (0.41 km²) serán objeto de estudio y monitoreo.

La cuenca alta del río Yeso presenta régimen nival, con los mayores caudales en los meses de diciembre y enero provenientes del derretimiento de nieve (figura 2).

2.2 Información disponible

Los datos empleados en la modelación, provienen de la campaña de terreno realizada durante el periodo de ablación 09-2017/05-2018. Esta campaña de terreno consideró mediciones de variables hidroglaciológicas de forma continua (escala 10-minutal) y discreta, implicando visitas mensuales a la zona de estudio para el rescate de información y toma de datos y muestras puntuales.

De cara a la medición continua de caudales provenientes de los glaciares, se instaló una estación fluviométrica en cada uno de los siguientes puntos: al cierre de la cuenca El Yeso en el sector Termas del Plomo (F_TP), en los frentes de los glaciares Bello (F_B) y Yeso (F_Y), en el cierre de la cuenca correspondiente a estos dos glaciares (F_BY) a 2 km del cierre de F_TP y en del río Yeso con el glaciar Pirámide (F_AP) a 0.3 km de F_TP. La estación F_AP se instala en el cierre de la subcuenca Bello-Yeso, dado que la cuenca del glaciar Pirámide no contaba con un único punto de salida; de esta forma por diferencia de los caudales medidos en F_TP y FA_P, fue posible estimar el aporte desde el glaciar Pirámide. Todas las estaciones fluviométricas, registraron cada 10 minutos

variables como: columna de agua, presión de agua y de aire, así como temperatura del agua y del aire y conductividad eléctrica. Las estaciones meteorológicas se instalaron sobre los mismos glaciares, con un total de cuatro estaciones AWS_Y sobre el glaciar Yeso, AWS_B sobre el glaciar Bello, AWS_P y AWS_D073 sobre los glaciares Pirámide y D-073, respectivamente. Cada AWS midió once variables asociadas a las cuatro componentes de la radiación, temperatura del aire, humedad relativa, presión atmosférica y altura de nieve (excepto para los glaciares Pirámide y D073). Los puntos de instalación de las estaciones AWS obedecieron a criterios técnicos, y de acceso y seguridad del equipo humano. De cara a la estimación del balance de masa glaciar mediante el Método Geodésico, se realizaron 3 campañas de medición con TLS (*Terrestrial Laser Scanning*) en octubre y

diciembre de 2017 y marzo de 2018, con un total de 22 levantamientos que abarcaron los glaciares Bello (9 levantamientos), el glaciar Yeso (9 levantamientos), el glaciar Pirámide (7 levantamientos). El número de levantamientos por campaña y por glaciar buscaba mapear la mayor extensión posible de cada uno de estos, tomando las imágenes desde lugares fijos de fácil acceso por parte del equipo humano.

Finalmente, se recolectaron a escala mensual, muestras de agua, nieve y hielo, con el objetivo de realizar análisis isotópico y químico para estimar de manera complementaria los aportes de diferentes fuentes, agua, hielo y nieve, a la escorrentía medida en la cuenca estudiada. Durante las campañas de terreno se tomaron muestras tanto en el cauce principal como en los distintos tributarios. En total se analizaron isótopos en 194 muestras y química 129.

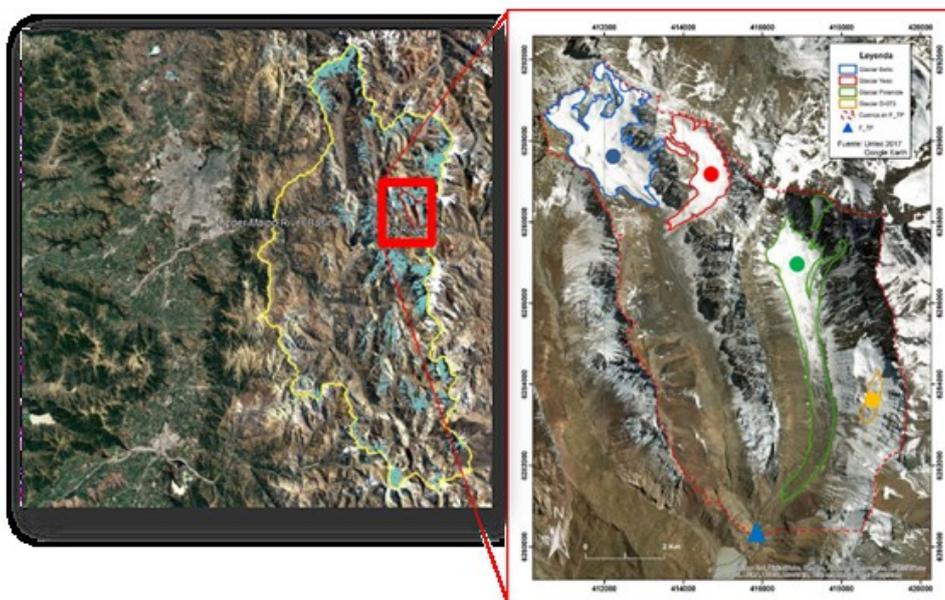


Figura 1. Localización de la zona de estudio.

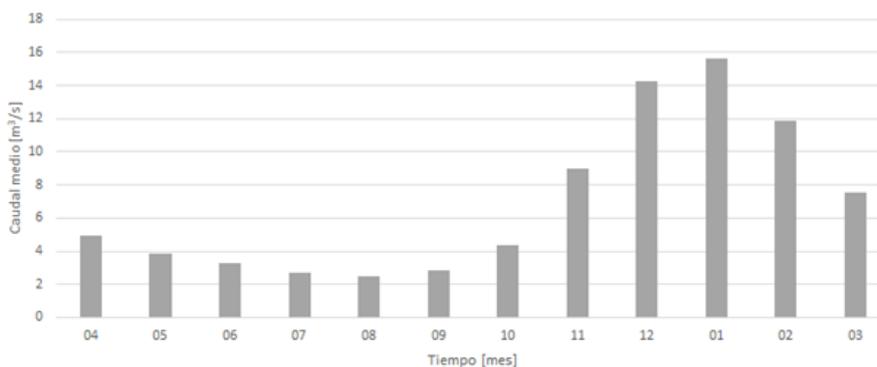


Figura 2. Régimen hidrológico de la cuenca alta del río Yeso. Fuente: datos proporcionados por Aguas Andinas.

2.3 Balance de masa

El balance de masa de un glaciar evalúa el cambio de masa por una unidad de tiempo como consecuencia de forzantes atmosféricas. En el caso de estudio, se empleó el Método Geodésico, donde el balance se estimó a partir de la diferencia de elevación de la superficie glaciar y densidad de un glaciar, obtenidos en dos instantes de tiempo.

Para estimar la diferencia de altura de la superficie glaciar, se emplearon las mediciones espaciales provenientes del TLS, donde la metodología de obtención del Modelo de Elevación o Digital Elevation Model (DEM) caracterizado por píxeles con alta precisión, en coordenadas x,y,z, se describe en Prantl *et al.*, (2017). La densidad glaciar se consideró como la densidad media del hielo.

2.4 Modelación hidroglaciológica

El modelo *Topographic Kinematic Wave Approximation and Integration* ETH Zürich (TE), simula cada proceso del balance hídrico de manera distribuida (basado en grillas) y posee orientación física. Los componentes del balance hidrológico simulados en TE son:

evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial, escorrentía subsuperficial y flujo base. Los procesos criosféricos considerados son: derretimiento de nieve y hielo, la evolución del albedo y avalancha de nieve.

El proceso de modelación en Topkapi consideró ajustes iniciales como ingreso de información puntual y distribuida (precipitación, temperatura, DEM, propiedades de la red hídrica, entre otros), extrapolación de datos, modelación de la radiación y evapotranspiración potencial y real; parametrización del derretimiento de hielo y nieve; y calibración y validación del modelo de glaciar y nival.

2.5 Modelo de mezcla

Para distinguir entre los aportes relativos de las diferentes fuentes a la escorrentía, se empleó el modelo de mezcla basado en miembros extremos, EMMA por sus siglas en inglés. Este método se basa en las ecuaciones de conservación de masa para el caudal, para el trazador $\delta^{18}O$ y la conductividad eléctrica (trazador hidroquímico):

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$C_T * Q_T = C_1 * Q_1 + C_2 * Q_2 + C_3 * Q_3$$

Donde Q_T es el caudal en la salida de la cuenca, Q_i es el caudal de cada una de las fuentes, C_i es la concentración de los trazadores en las fuentes y en las muestras en la salida de la cuenca. La segunda ecuación se ocupa para cada uno de los trazadores utilizados.

La incertidumbre de los aportes relativos asociados a cada muestra se realiza un método el cual emplea la incertidumbre de las concentraciones de los trazadores, tanto en las fuentes como en la escorrentía, para su propagación en el modelo de mezcla. Para la separación de hidrograma, se interpolaron temporalmente las fracciones de aporte de cada fuente y fueron ponderadas por los caudales medios diarios medidos en la cuenca.

3. RESULTADOS

Los principales resultados tanto del procesamiento de los datos obtenidos en terreno, como de la modelación en TE, se enfocan en la estimación de la diferencia de altura dh (m), el balance de masa GMB (mae), la cuantificación del aporte glaciar a la escorrentía (m^3/s) y la separación del hidrograma por fuente de flujo (nieve/hielo/interacción con unidades geológicas).

En los glaciares descubiertos Bello y Yeso, se observa una tendencia en la dh (m) respecto a la elevación, donde a menor altura mayor dh (m) (figura 3 izq.). Considerando ambos glaciares, entre los 4,000-4,200 msnm la dh es mayor en el glaciar Yeso, manifestándose esta diferencia en la pendiente ($dh/elevación$), donde el valor para el glaciar Yeso es cercano al triple respecto al

glaciar Bello, esto quiere decir que cada 1000 m en elevación se espera que la superficie glaciar presente un dh acumulado positivo o negativo promedio de 1.31 m y 3.24 m en los glaciares Bello y Yeso, respectivamente. Espacialmente, las mayores pérdidas de altura se presentan en el área adyacente roca/glaciar, lo cual puede estar asociado a la pérdida de nieve registrada en octubre, la cual cae desde las laderas rocosas.

La dh en el glaciar Bello, con datos entre los 4,000 y 5,000 msnm, presenta altos valores (entre -18 y -8 m) en áreas con alta pendiente y cercanos al borde del glaciar. Bajo los 4,200 msnm el derretimiento es mayor a 6 m lográndose una alta cobertura de datos. Por otro lado, la dh en el glaciar Yeso, presenta altas diferencias en los costados del glaciar, siendo de mayor relevancia el derretimiento en la zona centro oeste alcanzando montos de hasta -8 m, zona de alta pendiente. La zona centro y próxima al frente, bajo los 4,200 msnm, asociado a una rimaya, muestra montos de derretimiento sobre los 8 m.

La superficie del glaciar Pirámide, a diferencia de los glaciares blancos antes descritos, no posee una superficie regular en extensiones considerables, sino que montículos producidos por el derretimiento diferencial dado por la cobertura de detritos, considerando su bajo valor promedio de dh (figura 3 der.); similar situación se presentó en Burger *et al.*, 2018 donde las menores diferencias de altura para el periodo 2013/15 se dieron en la zona central de la lengua del glaciar. En los datos distribuidos de dh entre octubre 2017 y marzo 2018 en el glaciar Pirámide, identificándose rangos máximos de -30.4 m y 4 m y una dh promedio de -0.6 m. Las máximas pérdidas en dh, al igual que en Burger *et al.*, 2018, son asociadas a Ice Cliff (color rojo) adyacentes, su mayoría, a lagunas supraglaciales, solo que los valores reportados por este autor no superan los -6m/año en promedio para el periodo 2013/15. Los montículos presentes en la superficie glaciar, impidieron registrar extensiones continuas en ésta, debido a que provocan sombra al láser emitido por el TLS.

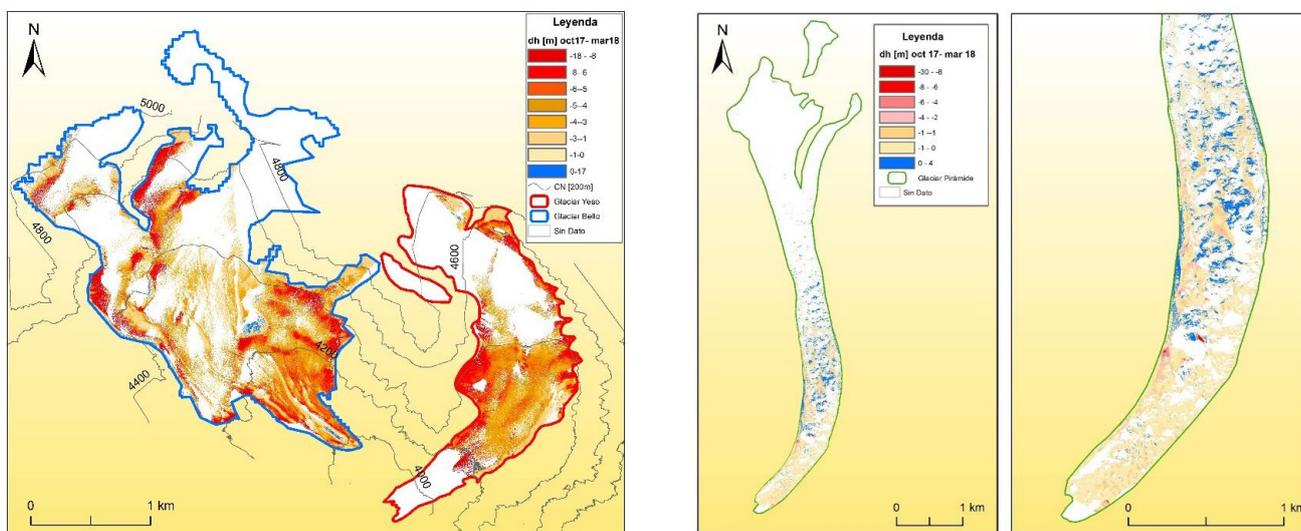


Figura 3. Mapas de diferencia de altura en los glaciares Bello y Pirámide entre octubre 2017 y marzo 2018

De acuerdo a los resultados obtenidos para dh, el balance de masa glaciar BMG [m a.e.] modelado en TE, se analizó respecto a rangos de elevación (figura 4). El comportamiento altitudinal del GMB en glaciares descubiertos (Bello y Yeso) es similar entre los 4,000-5,000 msnm, observándose valores negativos a menos elevación, sin embargo, entre los 4,000-4,200 el

glaciar Bello conserva masa glaciar respecto a Yeso, debido al efecto de la cobertura de detritos existente en el frente del glaciar; este comportamiento es similar al reportado por Ayala *et al.*, (2016) para el periodo 2014/15 con BMG máximos alrededor de -3 y -5 mea para Bello y Yeso, respectivamente. Por otro lado, los glaciares altamente cubiertos por detritos,

Pirámide y D073, muestran menor pérdida de masa respecto a los descubiertos, considerando que su extensión se encuentra mayormente bajo los 4,000 msnm., comportamiento congruente con el modelado por Ayala *et al.*, (2016). El glaciar Pirámide, con una extensión altitudinal mayor a la de los otros tres glaciares, permite conocer el efecto de protección de la cobertura de detritos en la pérdida de masa, donde en el rango 3,200-4,000 msnm se observan valores negativos de BMG a medida que aumenta la elevación, asociado a que a mayor elevación el espesor de detritos disminuye; Ayala *et al.*, (2016) reportó BMG alrededor de -4 me a los 4,000 msnm para el periodo 2014/2015, ligeramente menor al modelado en este estudio. Sobre los 4,000 msnm, el BMG del glaciar Pirámide, logra un comportamiento similar al observado en los glaciares descubiertos, lo cual

se asocia a la inexistencia de una capa de detritos en su superficie. Respecto al glaciar D073, es posible que el BMGs simulado haya sido sobreestimado, a pesar de ello, presenta ablación correspondiente a las observaciones realizadas en terreno con Terrestrial Laser Scanning (TLS).

Considerando que se cuenta con valores de BMG en toda la superficie de los glaciares, fue posible estimar el balance de masa específico promedio de verano bs estimado como la relación entre BMG (mae) en grillas de 30 m y el área del glaciar S asociado al número de grillas en cada glaciar.

El be para los glaciares descubiertos fue -1.165 (Bello) y -1.408 (Yeso), para el glaciar Pirámide -2.554 mae y rocoso D073 de -1.061 mae (figura 4) valores contextualizados según literatura previa (Burger *et al.*, 2018; Ayala *et al.*, 2016).

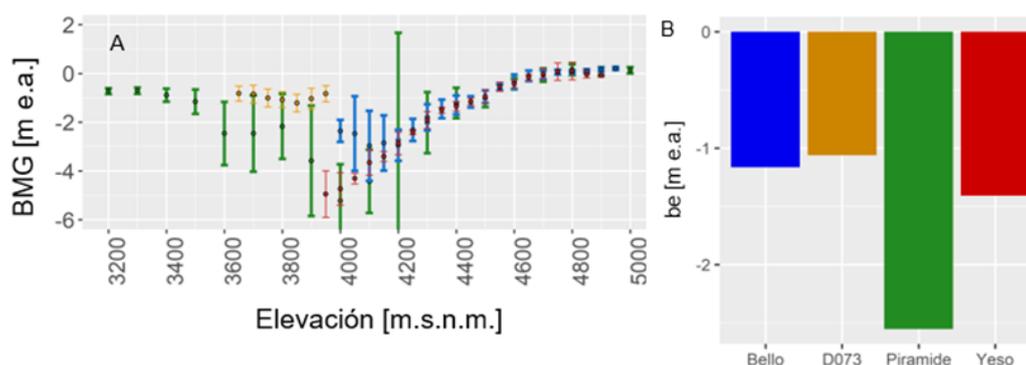


Figura 4. Distribución del BMG respecto a la elevación (A) y el balance de masa específico promedio de verano de los glaciares (B).

Los resultados de calibración se muestran en los puntos de la cuenca antes del aporte del glaciar Pirámide (F_AP) y a la salida de la cuenca de estudio (F_TP), se empleó la serie de caudal horario medida en F_AP entre nov/2017 y abr/2018, con solo 1% de datos faltantes; para la validación, se usó la serie horaria correspondiente a F_TP con un 92% de datos registrados entre sep/2017 a abr/2018.

Si bien el caudal simulado en F_AP (figura 5 arr.) es subestimado en el mes de marzo, mientras que en enero y febrero fue superior al medido en un 35 y 20%, respectivamente, la evaluación del error fue satisfactoria (KGE de 6.7 y r2 de 0.73). En F_TP el caudal simulado

presenta mejor ajuste, excepto en el mes de enero, mes en el cual se hace evidente el aporte del glaciar Pirámide.

El resultado observado en la simulación de los caudales en Termas del Plomo, se encuentra limitado por los procesos de almacenamiento del glaciar Pirámide, los cuales controlan la respuesta hidrológica de la cuenca a partir del mes de enero (figura 5, abj.), generando un aporte máximo del 65% y drenando al final del periodo de ablación cerca del 60% del caudal medido a la salida de la cuenca, mientras que los glaciares descubiertos Bello y Yeso, aportan solo un 10%, de este modo los volúmenes aportados por la cuenca Pirámide en el mes de enero son

subestimados por el modelo y se sobreestiman los máximos diarios durante febrero. Sin embargo, el comportamiento horario simulado logra reproducir el volumen luego de tormentas

y la variabilidad diaria de caudal, de manera similar el Q sim en TP logra los volúmenes aportados por la cuenca Pirámide en el mes de enero.

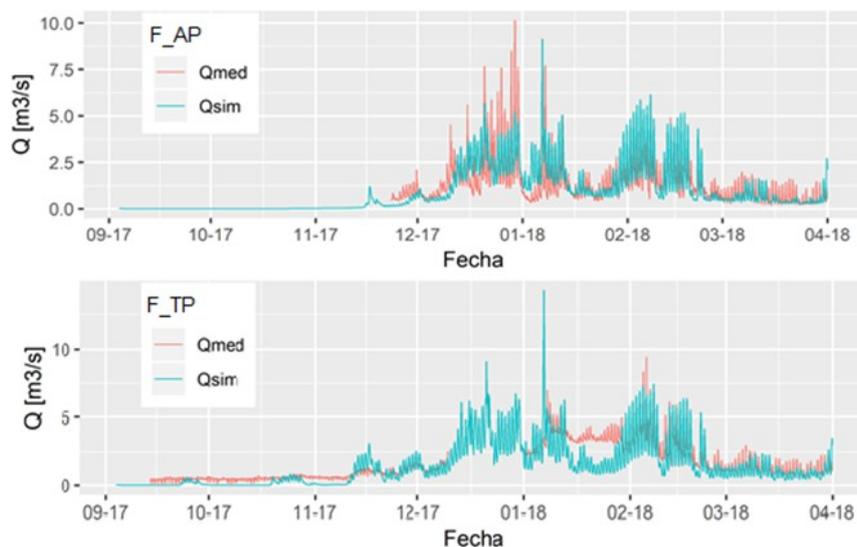


Figura 5. Descargas horarias medidas (rojo) y simuladas (azul) en F_AP (arriba) y F_TP (abajo).

3.1 Separación del hidrograma

La separación del hidrograma en la estación F_TP mediante el modelo de mezclas, se realizó a partir de los datos de $\delta^{18}O$ y de CE y los caudales medidos en TP. En la figura 6, se observa que los valores de aportes de agua con alta interacción con las unidades geológicas, varían desde un 70% en septiembre hasta valores inferiores al 40% a principios de diciembre. Los mayores caudales asociados a esta fuente ocurren en enero y disminuyen junto con el caudal total hacia fines de la temporada.

Los aportes directos de nieve en septiembre son nulos, aumentando durante el periodo de deshielo temprano, hasta superar el 40% de aporte de la escorrentía total en noviembre. Los mayores caudales asociados a esta fuente ocurren a fines de diciembre. Si bien, en porcentaje, los aportes de nieve directa son mayores en noviembre y principios de diciembre, en la figura 6, se aprecia que los peaks en el aporte relativo de nieve coinciden con peaks de caudal ocurridos en diciembre y enero, superando el aporte en noviembre.

Los aportes directos del derretimiento de glaciares aparecen de forma considerable en diciembre, asociado al aumento de los caudales. Tanto los caudales como la fracción de aporte correspondiente a esta fuente alcanzan sus mayores valores en enero. Posteriormente, durante marzo, tienden a disminuir a la vez que los caudales totales disminuyen.

Se debe comentar que la diferenciación de origen presenta una certeza aceptable en el caso de agua con contacto con unidades geológicas, pero no así en la diferenciación de agua de origen nival o glacial.

El modelo TE por su parte, permite simular los aportes provenientes de lluvia, nieve y hielo. En la figura 4 (izq.), se observa que el mayor aporte fue realizado por el glaciar Pirámide (13.3 Mm^3), seguido del glaciar Bello (6.3 Mm^3), Yeso (3.5 Mm^3) y D073 (0.5 Mm^3), para el periodo octubre a marzo. El aporte total nieve/hielo proveniente de los glaciares estudiados corresponde aproximadamente al 11% de la capacidad del embalse El Yeso, donde cerca del 8% proviene del aporte directo de hielo.

Respecto a la contribución total a la salida de la cuenca del río eso en el sector Termas del Plomo, el porcentaje estimado de contribución se explica principalmente por nieve (63%), seguido de hielo (24%) y lluvia (13%) durante el periodo septiembre 2017 a marzo figura 4 (der): Estos resultados reafirman con lo observado por Burger *et al.*, (2018), quien señala un incremento

del aporte de derretimiento de hielo a la escorrentía total, pasando de 11.6% entre 2000/13 a 20.4% para 2013/15. Por otro lado, Ayala *et al.*, (2016) reportó valores similares de contribución por fuente de flujo para el año 2013/14 (65%, 25% y <10% para nieve, hielo y lluvia aproximadamente).

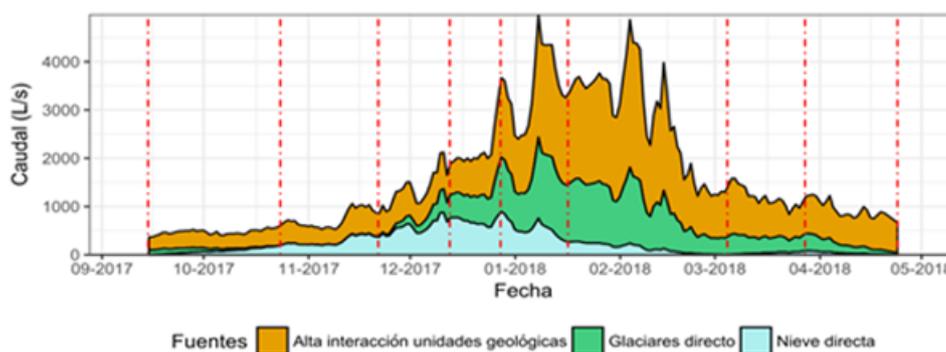


Figura 6. Separación del hidrograma en F_TP según modelo de mezcla (unidades geológicas, glaciar o nieve, arr.) y contribución total por fuente y glaciar (abj.).

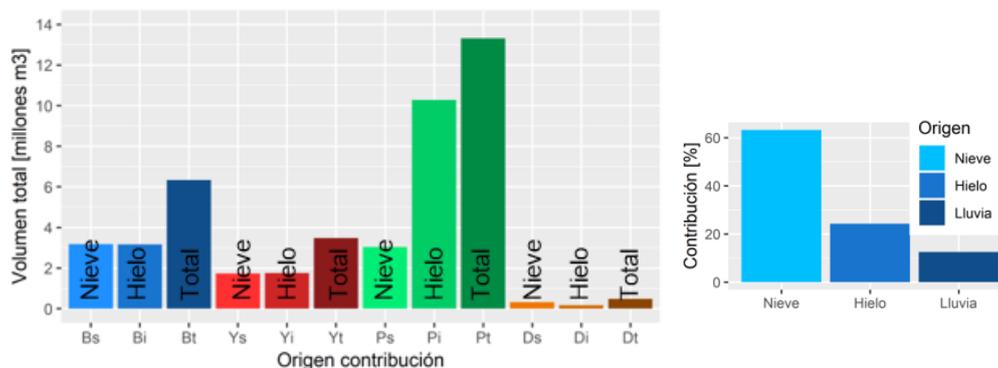


Figura 7. Contribución total de nieve/hielo por glaciar (izq.) y contribución total de nieve/hielo/lluvia a la cuenca en F_TP (der.).

4. CONCLUSIONES

Durante la etapa de ablación 2017/2018 ocurrida en la cuenca alta del río Yeso, se realizaron mediciones de caudal instantáneo, cota de elevación de la superficie glaciar y trazadores naturales en diferentes fuentes de agua, conducentes a determinar cambios en la altura glaciar y balance de masa y apoyar en la modelación de la dinámica del aporte glaciar en el sector Termas del Plomo.

Como resultado de la modelación, en términos de aporte a escala de cuenca, a la salida de la

cuenca, el volumen total aportado se compone por nieve (63%), seguido de hielo (24%) y lluvia (13%) para el periodo octubre 2017 a marzo 2018.

En términos del aporte proveniente de cada glaciar, el glaciar Pirámide contribuyó en un 56%, seguido del glaciar Bello (27%) y el glaciar Yeso (15%), donde el glaciar rocoso D073 contribuyó sólo el 2%. Desde el punto de vista de la contribución de cada glaciar a la escorrentía en la cuenca en estudio, el glaciar Pirámide aportó un 44%, proveniente de hielo,

mientras que los glaciares Bello y Yeso, que sumados contribuyeron el 20%. Este aporte glaciar, se vincula directamente con los balances de masa glaciar negativos observados y simulados, donde el glaciar Pirámide perdió cerca de 2.5 mae, seguido del glaciar Yeso (1,408 mae) y Bello (1,165 mae).

Los resultados anteriores, que representan cerca del 8% de la capacidad operativa del embalse El Yeso, una de las principales reservas hídricas para abastecimiento, están en consonancia con lo expuesto por otros autores, dejando explícita la necesidad de comprender más profundamente la dinámica glaciar durante la etapa de ablación, en términos de la gestión y anticipación a impactos en el abastecimiento producto de la variabilidad climática propia de la zona y/o cambio climático.

Tanto la campaña de medición como el proceso de modelación, permiten reafirmar que es menester profundizar en la medición sistemática

de variables como fluviométricas, meteorológicas y glaciológicas relevantes para entender los glaciares, con el fin de minimizar la incertidumbre a los procesos hidrológicos involucrados y contar así, con herramientas más robustas que sirvan de apoyo a la toma de decisiones en torno a la gestión del recurso hídrico altamente dependiente de la dinámica glaciar.

AGRADECIMIENTOS

Este documento ha sido elaborado en el marco de la iniciativa Estudio del Aporte Glaciar a la Cuenca del Río Maipo, financiada en conjunto por Aguas Andinas, Sociedad de Canal de Maipo y la Junta de Vigilancia de la 1ª Sección del Río Maipo, y ejecutada de manera colaborativa con la Fundación para la Transferencia Tecnológica de la Universidad de Chile y Cetaqua Chile.

REFERENCIAS

- Aguas Andinas. 2018. Reporte Integrado. 321 p.
- Ayala A., Pellicciotti F., MacDonell S., McPhee J., Vivero S., Campos C., Egli P. 2016. Modelling the hydrological response of debris-free and debris-covered glaciers to present climatic conditions in the semiarid Andes of central Chile. *Hydrological Processes* 30(22): 4036-58.
- Burger, F., Ayala, A., Farías, D., Shaw, T., MacDonell, S., Brock, B., McPhee, J. & Pellicciotti, F. 2018. Interannual variability in glacier contribution to runoff from a high-elevation Andean catchment: understanding the role of debris cover in glacier hydrology. *Hydrological Processes* 33: 214-229.
- Castillo, Y. 2015. Caracterización de la hidrología glaciar de la cuenca del río Maipo mediante la implementación de un modelo glacio-hidrológico semi-distribuido físicamente basado. Tesis de Magister, Universidad de Chile, Santiago. 58 p.
- Dirección General de Aguas DGA. 1979. Inventario de glaciares de la hoya del río Maipo. Estudio realizado por Cedomir Marangunić para el Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Hidrología. Santiago, Chile. 80 p.
- Dirección General de Aguas DGA. 2011a. Catastro, exploración y estudio de glaciares en Chile central. Estudio realizado por Geoestudios Ltda para el Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Unidad de Glaciología y Nieves. S.I.T. 382. Santiago, Chile. 178 p.
- Dirección General de Aguas DGA. 2011b. Catastro, exploración y estudio de glaciares en Chile central - Anexos. Estudio realizado por Geoestudios Ltda. para el Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Unidad de Glaciología y Nieves. S.I.T. 265. Santiago, Chile. 139 p.
- El Mercurio. 2019. Inventario será publicado en vísperas de la COP25: el 53% de avance, catastro de glaciares revela pérdida de hielos y fragmentación. Nieves Aravena, periodista.

- Peña, H. Nazarala, I. 1987. Snowmelt-runoff simulation model of a central Chile Andean basin with relevant orographic effects. Large Scale Effects of Seasonal Snow Cover. Proceedings of the Vancouver Symposium. Vancouver. IAHS Publ. No. 166. 12 p.
- Prantl, H., Nicholson, L., Sailer, R., H. F., Irmgard, J. & Rastner, P. 2017. Glacier Snowline Determination from Terrestrial Laser Scanning Intensity Data. *Geosciences* 7(60): 1- 21.
- Rivera, A., F. Bown, D. Carrion, & P. Zenteno. 2012. Glacier responses to recent volcanic activity in Southern Chile. *Environmental Research Letters* 7, 014036. 15 p.
- Vaughan, D.G., Comiso, J.C., Allison, I., Carrasco, J., Kaser, G., Kwok, R., Mote, P., Murray, T., Paul, F., Ren, J., Rignot, E., Solomina, O., Steffen, K. & Zhang, T. 2013. Observations: Cryosphere. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K.M., Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 66p.
- World Glacier Monitoring Service WGMS. 2008. *Global Glacier Changes: facts and figures*. United Nations Environment Programme. 45 p..

Como citar este artículo:

Quevedo-Tejada, D., Landeros, E., Olivares, D., McPhee, J., Caro, A., Berroeta, C., Poblete, C., Reyes, J., Fleege, H., Carvallo, J., Fuentes, J. (2019). Dinámica de la contribución glaciaria a la cuenca alta del río Yeso durante el periodo de ablación 2017/2018. *Aqua-LAC* Volumen 11(2), 59-70. doi: 10.29104/phi-aqualac/2019-v11-2-06



Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International
CC BY-NC-SA 4.0 license