

# Ice elevation changes surveyed with Airborne Laser Scanning Data (Cambios de elevación de hielo medidos con Láser aerotransportado)

Jorge HERNÁNDEZ, Pablo PAREDES, Daniela CARRION y Andrés RIVERA

**Resumen-** Se presentan los cambios de elevación detectados en el periodo 2013-2016 de los glaciares Olivares Alfa y Beta, ubicados en la cuenca alta del Río Olivares (33°06'-33°14' S y los 70°10'-70°14' W), utilizando modelos digitales de elevación (MDE) generados a partir de datos láser (LiDAR). La tasa anual registrada es de  $-1.64 \pm 0.08$  m/año para Alfa y  $-0.94 \pm 0.10$  m/año en Beta. Estos adelgazamientos se relacionan con variables meteorológicas, donde se ha detectado que el aumento de temperatura en altura y el déficit de precipitaciones observadas en los últimos años en Chile Central, son los principales factores explicativos.

**Índice de Términos**---- Cambios de elevación, MDE, LiDAR, precipitación, temperatura.

## I. INTRODUCCIÓN

La determinación de la topografía superficial de un glaciar y sus cambios, permiten evaluar la dinámica de un glaciar y su relación con factores meteorológicos predominantes en las zonas englacadas. Los cambios de elevación de la superficie del hielo son un indicador del estado de equilibrio del glaciar.

Así, un glaciar estable se caracteriza por una topografía que no manifiesta grandes cambios debido a que las acumulaciones en las partes altas y las pérdidas de masa en las partes baja, son compensadas por el flujo de hielo. Mientras que un glaciar en desequilibrio, se caracterizará por cambios de elevación relacionados con el signo del balance de masa o a los cambios dinámicos que haya experimentado el hielo [1].

En general, los sensores remotos, incluyendo los sistemas de medición láser, han sido ampliamente utilizados en glaciología [2], debido a que representan un sistema que -operado desde el aire o tierra- permite medir la topografía superficial de un cuerpo de hielo con alta precisión y con coberturas más amplias que las obtenidas con otros instrumentos topográficos convencionales (estaciones totales o GPS).

Cuando los datos topográficos de distintas fechas de adquisición son comparados entre sí, las variaciones obtenidas permiten el cálculo del balance de masa de un glaciar, para lo cual hay que convertir dichos cambios de elevación en equivalente en agua utilizando las densidades superficiales. El uso de modelos digitales de terreno para determinación de balances de masa se denomina método "geodésico" [3].

J.Hernández, P.Paredes and D.Carrion are with the Laboratorio de Glaciología, Centro de Estudios Científicos (CECs), Valdivia, Chile (e-mail: jhernandez@cecs.cl).

A. Rivera is with the Laboratorio de Glaciología, Centro de Estudios Científicos (CECs), Valdivia, Chile and also with the Departamento de Geografía, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

El objetivo de este estudio es calcular mediante la comparación de modelos de elevación digital (MDE) generados con LiDAR, los cambios registrados en los glaciares Alfa y Beta ubicados en la cuenca alta del río Olivares para el periodo 2013-2016. Luego se analizan dichos cambios, en relación a las condiciones meteorológicas prevalecientes en años recientes, utilizando datos de estaciones cercanas.

### A. Área de estudio

El área de estudio es la cuenca alta del río Olivares (Fig. 1) ubicada en la región de Metropolitana, donde se tiene un rango altimétrico desde 3700 a 5600 m.s.n.m. (metros sobre el nivel del mar). El clima de la región central de Chile, donde se ubica esta cuenca, se caracteriza por el marcado contraste entre una estación seca y cálida entre los meses de diciembre y marzo, y una estación fría y húmeda entre mayo y septiembre. Durante el invierno, toda la humedad proviene del Pacífico es traída por sistemas frontales que cruzan la zona, y es acumulada en forma de nieve en la alta cordillera, la cual se mantiene congelada hasta el inicio del periodo de derretimiento aproximadamente a comienzos de primavera [4].

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### A. CECs Airborne Mapping System

Para la toma de datos topográficos de la superficie de los glaciares se ha empleado un sistema láser integrado (RIEGL LMS-Q240) de tipo aerotransportado, CECs Airborne Mapping System (CAMs), que emite un haz de luz que se refleja en la superficie y es recibido en el receptor. Para determinar la altura del emisor y referenciarlo a nivel altimétrico se utiliza un GPS geodésico de doble frecuencia (JAVAD Lexon LGGD). Adicionalmente, para corregir las variaciones de la aeronave y orientar las mediciones láser, se utiliza una plataforma inercial (iNAV-FMS-Airsurv) la que registra el movimiento de la aeronave en sus tres ejes (Roll, Pitch, Heading). Entre otros sensores instalados, se encuentran una cámara fotográfica Canon EOS 7D y una cámara termográfica Flir SC6.

### B. Contorno Glaciar

En el análisis de los MDE se utilizaron los polígonos de las cuencas de glaciares delineadas a partir de imágenes satelitales capturadas el año 2013. Las imágenes satelitales utilizadas fueron capturadas por el satélite GeoEye-1 para el 27 y 30 de marzo del 2013. Estas imágenes fueron procesadas y

analizadas con el software ArcMap 10.2.2., siendo corregidas radiométrica y ortométricamente.

Mediante métodos de clasificación (supervisada y no supervisada) sobre relaciones de bandas espectrales, se realizó el análisis de los contornos glaciares, siendo interpretados gracias a una resolución espacial óptima de las imágenes, obteniéndose de este modo la mejor delimitación glaciaria posible. Estos procedimientos se ajustan a metodologías utilizadas extensamente en estudios glaciológicos [5]–[7].

### C. Ajuste y Corrección MDE

En la corrección de los MDE, se analizaron las diferencias a lo largo de las trayectorias de vuelo de las diferentes campañas aéreas (zona de roca); siendo posible detectar un incremento de las tasas de error en zonas de curvas, debido principalmente a los drásticos cambios en los ángulos de orientación del helicóptero, medio de transporte utilizado en este estudio) [8]. De manera adicional, mediante la comparación de cada MDE con puntos de control (GCPs, *Ground Control Points*), medidos con el método GPS diferencial, es posible evaluar la incertidumbre asociada en la medición LiDAR [9].

### D. Cambios de Elevación

Los datos con topografía superficial disponibles ( $Z$ ) para el área de estudio, fueron comparados entre dos periodos de medición ( $T_{2013}-T_{2016}$ ) (1):

$$DH = Z_{t_2} - Z_{t_1} \quad (1)$$

Donde (DH) corresponde a los cambios de elevación que experimenta un glaciar en un intervalo de tiempo.

El error combinado total ( $E_c$ ) de los DH es estimado a partir de la sumatoria cuadrática (2) de las incertidumbres individuales ( $E_{2016}$  y  $E_{2013}$ ) de cada MDE [10].

$$E_c = \sqrt{(E_{2016})^2 + (E_{2013})^2} \quad (2)$$

Todos los MDE antes mencionados fueron llevados a una grilla en común con una resolución de 5 m en coordenadas UTM- huso 19S, datum WGS84 y elevación elipsoidal.

### E. Análisis local de variabilidad climática

Las estaciones meteorológicas en la zona de estudio (Fig. 1) cuentan con al menos un año de datos de temperaturas entre 2013 y 2016. La ubicación, altitud y fecha de inicio de los registros se muestran en la TABLA II-I. El rango altimétrico de la red va desde los 3606 ms.n.m, donde se encuentra la estación (1) ubicada frente al glaciar Esmeralda, hasta 4587 ms.n.m con la estación (8) instalada sobre el hielo en el glaciar Paloma Norte.

Los sensores de temperatura en cada estación ((1) a (8) en TABLA II-I) se encuentran separados del suelo entre 2 y 4 metros, distancia que varía durante el año debido a la acumulación/derretimiento de nieve en la estación. El promedio mensual de temperatura se calculó sólo para los meses con al menos el 85% de días con datos.

Debido a que no se cuenta con un registro pluviométrico de larga data dentro de la zona de estudio, se usó la red de estaciones de la Dirección General de Aguas (DGA) y la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) obtenidos desde la base de datos del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2. Datos diarios de precipitación fueron convertidos a montos acumulado anual sólo para años con 12 valores mensuales válidos. Un valor acumulado mensual se consideró válido sólo para meses con hasta 4 datos faltantes (>85% completitud).

TABLA II-I  
UBICACIÓN ESTACIONES METEOROLÓGICAS AUTOMÁTICAS EN ZONA DE ESTUDIO.

ID	Latitud	Longitud	Altitud (m.s.n.m).	Inicio Registro
(1)	33.214°S	70.178W	3606	2015/Dic
(2)	33.156°S	70.165W	3663	2015/Feb
(3)	33.164°S	70.208W	4004	2015/Feb
(4)	33.178°S	70.216W	4231	2013/Jul
(5)	33.145°S	70.197W	4428	2013/Oct
(6)	33.173°S	70.238W	4466	2015/Ago
(7)	33.194°S	70.221W	4459	2014/Abr
(8)	33.178°S	70.247W	4587	2016/Feb

## III. RESULTADOS

### A. Cambios de Elevación y Balance de Masa

A partir de los modelos de elevación se estimaron las variaciones altimétricas (Fig. 1) correspondientes al periodo 2013-2016, con un valor medio de  $-4.91 \pm 0.25$  m en Alfa y  $-2.83 \pm 0.32$  m en Beta. Al expresar estas diferencias en una tasa anual, el adelgazamiento es de  $-1.64 \pm 0.08$  m/año y  $-0.94 \pm 0.10$  m/año respectivamente (Tabla III-I).

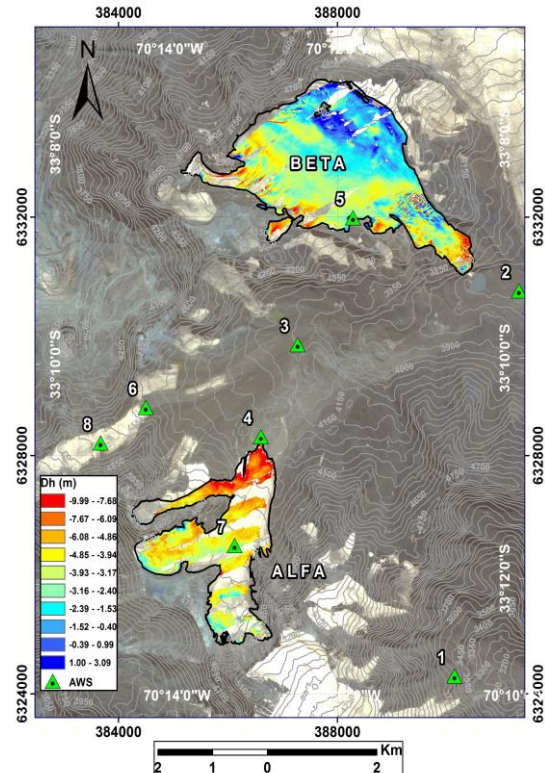


Fig. 1 Cambios de elevación glaciares Olivares Alfa y Beta para el periodo 2013-2016 (m). Imagen de fondo RapidEye marzo 2015, proyección UTM-19S, Datum WGS84.

TABLA III-I  
ÁREA, DIFERENCIA DE ELEVACIÓN, TASA ANUAL Y SU CORRESPONDIENTE ESTIMACIÓN DE ERROR POR GLACIAR.

Glaciar	Área 2013 (km <sup>2</sup> )	Dh (m)	Dh/año (m / año)	$\sigma_{xy}$ (m)
Alfa	3.95	-4.91	-1.64	0.25
Beta	7.39	-2.83	-0.94	0.32

B. Análisis local de variabilidad climática

En la Fig. 2, se muestra la variación porcentual de la precipitación acumulada anual entre 2013 y 2016, respecto al promedio entre 1980 – 2009. Estaciones individuales en el valle central, al oeste de la cuenca, registran déficit hasta un 40% durante este periodo.

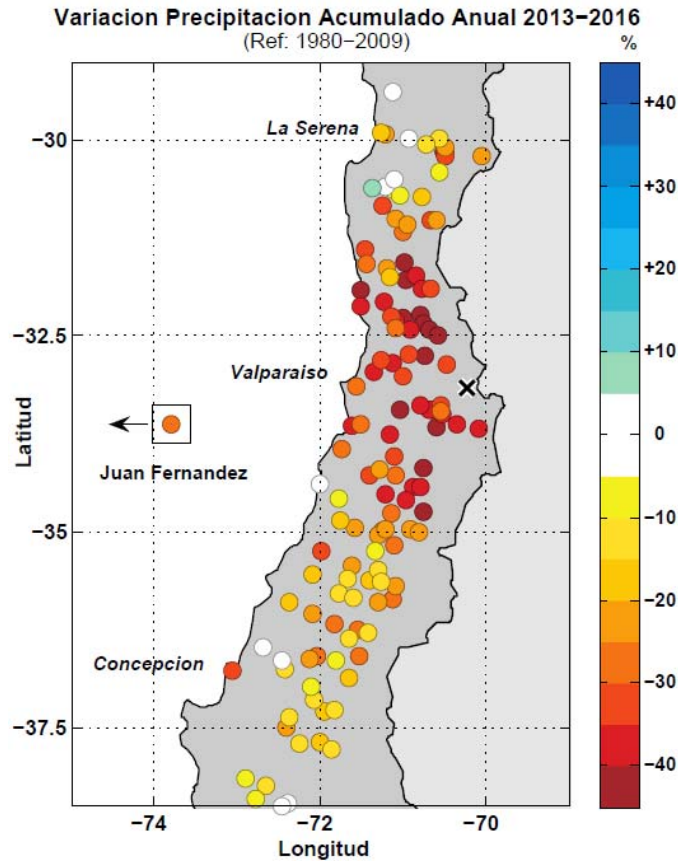


Fig. 2 Cuadro de variación porcentual de precipitación acumulada anual entre 2013 y 2016 respecto a periodo de referencia 1980 – 2009. Ubicación de la zona de estudio se indica con una 'x' en el mapa.

La Fig. 3 muestra el gradiente vertical promedio de temperatura del aire, obtenida a partir de la pendiente de la recta ajustada mediante mínimos cuadrados a cada set de puntos. En cada grupo, las diferencias en el promedio de temperaturas son explicadas por la variación en la altitud geográfica entre las estaciones ( $R^2 = 0.98$ ). La amplitud del ciclo anual (DEF – JJA) es 10.0 °C en promedio, lo que implica que la altura de la isoterma 0°C se ubique en torno a 4365 ms.n.m. durante el verano y bajo los 3144 ms.n.m. en el invierno.

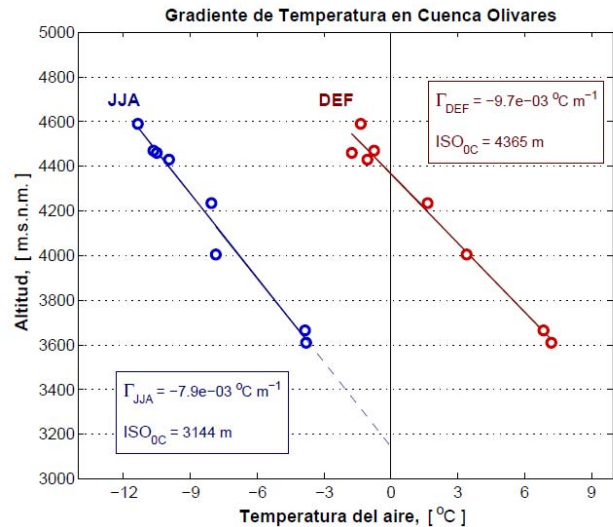


Fig. 3 Gradiente vertical de temperatura del aire derivado a partir de promedios estacionales: JJA (azul) y DEF (rojo). El valor de la pendiente de la regresión lineal simple (línea sólida) y la intersección al eje 0°C se indican como  $\Gamma$  y  $ISO_{0C}$ , respectivamente.

IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

Para evaluar la incertidumbre de los diferentes MDE, es necesario la comparación de la altimetría en zona de superposición de roca (residuales) y a través de la comparación con datos GCPs [9], cuyo valor máximo estimado es de  $\pm 0.32$  m. Si bien, la distribución espacial de los GCPs fue limitada debido a la dificultad de acceso a zonas de altas cumbres, el error es representativo para toda la extensión medida.

Las diferencias detectadas en Alfa ( $-1.64 \pm 0.08$  m/año) y Beta ( $-0.94 \pm 0.10$ ), se calcularon sólo para las áreas con coberturas de datos en ambos MDE, los que alcanzaron a un 60% y 90% del Alfa y Beta respectivamente. Las diferencias registradas (un 80% más en el caso de Alfa), estaría asociado al rol que juegan los patrones topográficos en la zona glaciar, como son la exposición y pendiente [11].

A pesar de no existir registros de larga data para observar variaciones climáticas locales en las últimas décadas, se estima que las condiciones en la zona de estudio no son ajenas al contexto de climático regional. En el corto plazo, del 2013 al 2016, se constató un profundo déficit de las precipitaciones en Chile Central, como muestra la Fig. 2. Este periodo es sólo la continuación de una sequía sostenida desde 2010 que no ha tenido precedentes en los registros históricos locales [12], [13]. Estudios previos, estiman que una disminución acentuada de la precipitación, como la observada durante los últimos años, podría tener un impacto negativo en el balance de masa de los glaciares en los Andes subtropical como aquellos estudiados en el presente trabajo [14], [15]. Por otra parte, se ha observado un aumento de temperatura en superficie de forma significativa y sostenida durante gran parte del siglo XX [16], con una tendencia positiva de la altura de la isoterma 0°C sobre Chile Central [17]. Falvey & Garreaud (2009) muestran que las temperaturas en la tropósfera sobre 1000 m.s.n.m al oeste de la cordillera de los Andes fueron en alza, hasta  $+0.25^\circ\text{C}/\text{década}$ , durante 1979-2006 [18].

En conclusión, para el periodo 2013-2016 se observan diferencias de elevación negativas para los dos glaciares estudiados. Estudios previos [19]-[20] con metodologías similares a las aplicadas [21], muestran adelgazamientos coincidentes con las observadas en las últimas décadas. Esto indica que de prevalecer las condiciones meteorológicas recientes, las pérdidas de hielo continuarán, afectando la generación de caudales e incluso la supervivencia del hielo en el largo plazo.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Centro de Estudios Científicos (CECs), instituto financiado por el programa de financiamiento Basal de CONICYT. Se agradece el apoyo de CODELCO para la realización de este trabajo.

#### REFERENCIAS

- [1] T. Jo and W. H. K. M. Schmeits, "Modelling the response of glaciers to climate warming," pp. 267–274, 1998.
- [2] J. L. Bamber and A. Rivera, "A review of remote sensing methods for glacier mass balance determination," *Glob. Planet. Change*, vol. 59, no. 1–4, pp. 138–148, Oct. 2007.
- [3] A. Rivera, F. Bown, F. Napoleoni, C. Muñoz, and M. Vuille, *Balance de Masa Glaciar*, CECs. Valdivia, Chile, 2016.
- [4] M. H. Masiokas, R. Villalba, B. Luckman, C. Le Quesne, and J.-C. Aravena, "Snowpack Variations in the Central Andes of Argentina and Chile, 1951 – 2005: Large-Scale Atmospheric Influences and Implications for Water Resources in the Region," *J. Clim.*, vol. 19, pp. 6334–6352, 2006.
- [5] A. Kääb, F. Paul, M. Maish, M. Hoelze, and W. Haerberli, "The new remote sensing derived Swiss glacier inventory: II. First results.," *Ann. Glaciol.*, vol. 34, pp. 362–366, 2002.
- [6] F. Paul and L. M. Andreassen, "A new glacier inventory for the Svartisen region, Norway, from Landsat ETM+ data: challenges and change assessment," *J. Glaciol.*, vol. 55, no. 192, pp. 607–618, 2009.
- [7] F. Paul, R. G. Barry, J. G. Cogley, H. Frey, W. Haerberli, A. Ohmura, C. S. L. Ommanney, B. Raup, A. Rivera, and M. Zemp, "Guidelines for the compilation of glacier inventory data from digital sources," Zürich, 2010.
- [8] N. Csanyi and C. K. Toth, "Improvement of Lidar Data Accuracy Using Lidar-Specific Ground Targets," vol. 73, no. 4, pp. 385–396, 2007.
- [9] M. Hodgson and P. Bresnahan, "Accuracy of Airborne Lidar-Derived Elevation: Empirical Assessment and Error Budget," *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol. 70, no. 3, pp. 331–339, 2004.
- [10] J. R. Taylor, *An Introduction to Error Analysis*, 2nd Editio., vol. 101. 1997.
- [11] N. S. Arnold, W. G. Rees, A. J. Hodson, and J. Kohler, "Topographic controls on the surface energy balance of a high Arctic valley glacier," *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, vol. 111, no. 2, pp. 1–15, 2006.
- [12] "Report to the Nation The 2010-2015 mega-drought : A lesson for the future," no. November, 2015.
- [13] J. P. Boisier, R. Rondanelli, R. D. Garreaud, and F. Muñoz, "Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 43, no. 1, pp. 413–421, 2016.
- [14] E. Sagredo and T. Lowell, "Climatology of Andean glaciers: A framework to understand glacier response to climate change," *Glob. Planet. Change*, vol. 86–87, pp. 101–109, 2012.
- [15] E. Sagredo, S. Rupper, and T. Lowell, "Sensitivities of the equilibrium line altitude to temperature and precipitation changes along the Andes," *Quat. Res. (United States)*, vol. 81, no. 2, pp. 355–366, 2014.
- [16] B. Rosenblüth, H. A. Fuenzalida, and P. Aceituno, "Recent temperature variations in south America," *Int. J. Climatol.*, vol. 17, pp. 67–85, 1997.
- [17] J. Carrasco, G. Casassa, and J. Quintana, "Changes of the 0°C isotherm and the equilibrium line altitude in central Chile during the last quarter of the 20th century," *Hydrol. Sci. J.*, vol. 50, no. 6, pp. 933–948, 2005.
- [18] M. Falvey and R. Garreaud, "Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006)," *J. Geophys. Res.*, vol. 114, no. D4, pp. 1–16, 2009.
- [19] M. H. Masiokas, D. A. Christie, C. Le Quesne, P. Pitte, L. Ruiz, R. Villalba, B. H. Luckman, E. Berthier, S. U. Nussbaumer, Á. González-Reyes, J. McPhee, and G. Barcaza, "Reconstructing the annual mass balance of the Echaurren Norte glacier (Central Andes, 33.5° S) using local and regional hydroclimatic data," *Cryosph.*, vol. 10, no. 2, pp. 927–940, 2016.
- [20] DGA, "Variaciones recientes de glaciares en Chile, según principales zonas glaciológicas. Realizado por Centro de Estudios Científicos para la Dirección General de Aguas. S.I.T. 261," Santiago, 2011.
- [21] H. J. Torres, A. Brenning, and J.-L. Garcia, "Balance de masa del glaciar cubierto del Pirámide (Chile Central, 33°S ) entre 1965 y 2000 aplicando métodos geodésicos," *Rev. Geogr. Espac.*, vol. 3, no. 5, pp. 11–25, 2014.