



## MODELADO DE UN PALEOGLACIAR DE VALLE EN LA VERTIENTE ORIENTAL DE LOS ANDES PATAGÓNICOS, PROVINCIA DEL CHUBUT: LIMITACIONES Y POSIBILIDADES

Daniel M. CANO<sup>1</sup>, Agustina REATO<sup>2</sup>, Edgardo L. NAVARRO<sup>3</sup>, Oscar A. MARTINEZ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Geología (CONICET), Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina. martin.cano@uns.edu.ar

<sup>2</sup>CIEMEP (UNPSJB/CONICET), Ruta 259, km 16,5, 9200 Esquel, Chubut.

agustinareato@comahue-conicet.gob.ar, oam1958@gmail.com

<sup>3</sup>Departamento de Geología (PAID CIC), Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina. enavarro@criba.edu.ar

### RESUMEN

Con el objetivo de verificar la utilidad de un método de modelación glacial aplicado exitosamente en otras regiones se lo ha empleado en la reconstrucción de un paleoglaciario de valle, desconectado del Manto de Hielo Patagónico, que ocupó la cuenca de los lagos La Plata y Fontana ( $44^{\circ}52'S / 72^{\circ}30'W$ ) y que se habría estabilizado en tiempos posteriores al Máximo de la Última Glaciación. El método utilizado es el propuesto por Benn y Hulton (2010) el cual integra el modelo numérico de Van der Veen (1999) con información topográfica y geomorfológica. La aplicación de operadores y herramientas de ArcGIS permitió la reconstrucción de la paleotopografía glacial, estimar superficies, espesores, volúmenes y una confiable Altitud de la Línea de Equilibrio (ALE). Este último valor fue comparado con los obtenidos por otros métodos tradicionales, confirmándose una aceptable concordancia entre los mismos. El modelo muestra limitaciones cuando se aplica a paleocuevas glaciales que funcionan en la actualidad como cuencas lacustres que no poseen información batimétrica, y para casos en que no se cuente con suficiente información geomorfológica que indique la paleosuperficie superior del hielo, constituyendo un auténtico desafío metodológico cuando se pretende reconstruir glaciares tipo manto de hielo como el Manto de Hielo Patagónico del Pleistoceno. El modelo obtenido se corresponde con un glaciario que habría tenido una superficie de  $730 \text{ km}^2$ , un espesor máximo de  $706 \text{ m}$ , un volumen de  $165 \text{ km}^3$  y una ALE de  $1.359 \text{ m}$  ( $\pm 20 \text{ m}$ ).

**Palabras clave:** Teledetección, Glaciaciones, ALE, Patagonia.

### ABSTRACT

*Modeling of a paleoglacier valley in the oriental slope of the patagonian Andes, Chubut province: limitations and possibilities.* In order to verify the usefulness of a glacial modeling method successfully applied in other regions, it has been used in the reconstruction of a paleoglacier valley, disconnected from the Patagonian Ice Mantle, which occupied the La Plata and Fontana lakes basin ( $44^{\circ} 52'S / 72^{\circ} 30'W$ ) and that it would have stabilized in times after the Last Glaciation Maximum. The method used was proposed by Benn and Hulton (2010) which integrates the numerical model of Van der Veen (1999) with topographic and geomorphological information. The application of ArcGIS operators and tools allowed the reconstruction of glacial paleotopography, estimate surfaces, thicknesses, volumes and a reliable Equilibrium Line Altitude (ELA). The latter value was compared with those obtained by other traditional methods, confirming an acceptable agreement between them. The model shows limitations when applied to paleoglacial basins that currently function as lacustrine basins that do not have bathymetric information, and for cases where there is not enough geomorphological information to indicate the upper paleosurface of the ice, which constitutes a real methodological challenge when it is intended to reconstruct ice-mantle glaciers such as the Pleistocene Patagonian Ice Mantle. The model obtained corresponds to a glacier that would have had an area of  $730 \text{ km}^2$ , a maximum thickness of  $706 \text{ m}$ , a volume of  $165 \text{ km}^3$  and an ELA of  $1.359 \text{ m}$  ( $\pm 20 \text{ m}$ ).

**Keywords:** Remote sensing, Glaciations, ELA, Patagonia. .

## INTRODUCCIÓN

Con la intención de verificar la utilidad y pertinencia de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para generar reconstrucciones paleoglaciales en estas latitudes, se ha procedido a la aplicación de esta herramienta en la cuenca cordillerana de los lagos Fontana y La Plata (SW de Chubut) (Fig. 1 a) la que cuenta con su esquema glacioestratigráfico (Ramos 1981) y para la cual se puede confirmar que ha sido ocupada por un glaciar de valle durante una estabilización posterior al Máximo de la Última Glaciación. Este tipo de englazamiento brinda mayores posibilidades en la aplicación de estas metodologías puesto que permite una delimitación precisa de la paleocuenca glacial. El procedimiento utilizado en este trabajo combina los SIG con planillas de cálculo específicamente elaboradas por otros autores (Benn y Hulton 2010). Los resultados obtenidos, especialmente aquellos que refieren a la posición de la altitud de la línea de equilibrio durante la glaciación (ALE), fueron luego comparados con aquellos alcanzados a través de otras técnicas más tradicionales y difundidas.

La presente contribución se enmarca en el plan de trabajo de Tesis Doctoral de uno de los autores (D.M. Cano) que tiene como objetivo determinar la configuración y los principales parámetros glaciológicos del segmento de Manto de Hielo Patagónico (MHP) que ocupó la cordillera de Chubut durante el Pleistoceno tardío y,

por lo tanto, ensayos metodológicos como el presentado en este resumen constituyen una etapa preliminar necesaria para lograr ese objetivo principal.

## METODOLOGÍAS

La utilización de SIG en la reconstrucción de paleoglaciares mediante modelos numéricos tiene un desarrollo relativamente reciente. Corresponde citar los trabajos de Vieira (2008), Rodríguez Rodríguez *et al.* (2011) y Fernández Fernández (2015), limitados a la Península Ibérica; así como Locke (1995) en las Montañas Rocallosas, Ng *et al.* (2010) en el Reino Unido, Glaseer *et al.* (2011) y Ruiz (2013) en Patagonia, entre otros. En este trabajo se ha utilizado el método propuesto por Benn y Hulton (2010) el cual aplica la ecuación de Van der Veen (1999) por medio de la hoja de cálculo *Profiler v.2*, programada en Excel. La misma resulta de la modificación de las fórmulas propuestas por Schilling y Hollin (1981) quienes a su vez adaptaron, a los glaciares de valle, la ecuación de Nye (1952). La metodología brinda la posibilidad de considerar en los cálculos evidencias geomorfológicas identificables en el terreno. Considerando la información geológica básica disponible para el área (Ramos 1981, Lapido 1999), de escala 1:200.000 y 1:250.000, respectivamente, se procedió al análisis, mediante ArcGIS 10.4, de imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ (231-091, combinación de bandas 234: falso color natural, descargada desde <https://earthexplorer.usgs>.-

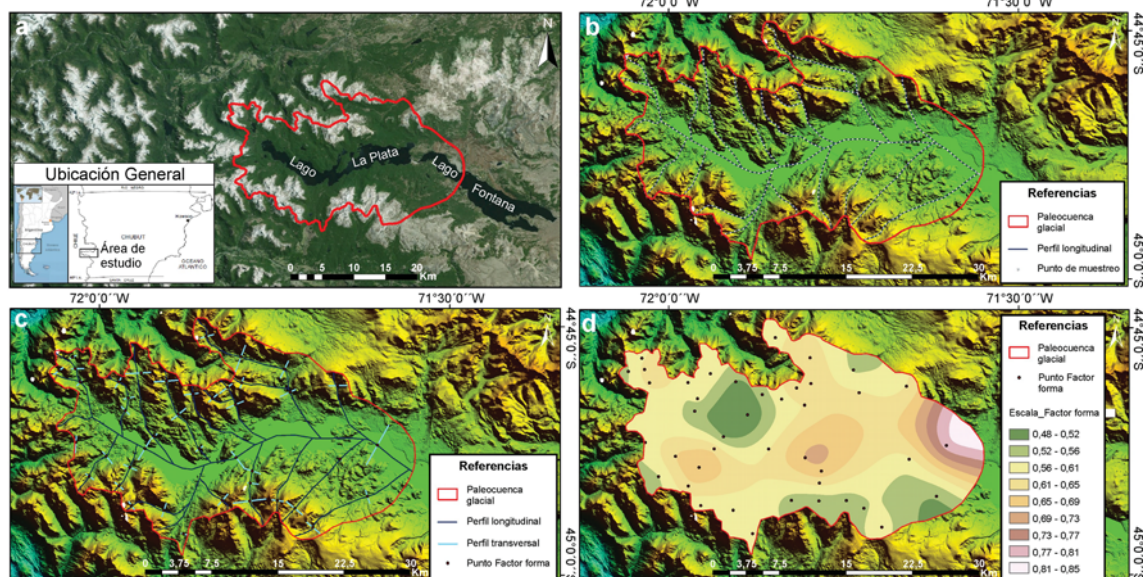


Figura 1. Ubicación general y secuencia metodológica desarrollada en la paleocuenca glacial de los lagos La Plata y Fontana. Cano D. Martín, Reato Agustina, Navarro Edgardo L. y Martínez Oscar A..

Secuencia metodológica desarrollada en la paleocuenca glacial de los lagos La Plata y Fontana (trazo rojo), para la obtención de los parámetros utilizados en la hoja *Profiler v.2*. a\_ Ubicación general del área de estudio. b\_ Trazado de perfiles longitudinales a los valles y definición de puntos de muestreo. c\_ Trazado de perfiles transversales a los valles y cálculo de factor de forma. d\_ Generación de un MDT a partir de la integración de los valores de factor de forma. Base Imagen Google Earth y MDE ALOS 30 m.

gov/) y de los Modelos Digitales de Elevación (MDE) SRTM (ventanas descargadas desde Global Mapper 15) y ALOS (S045W072, descargado desde <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/data/index.htm>) de 90 m y 30 m de resolución espacial, respectivamente. El mismo SIG se utilizó para elaborar la cartografía, la implementación espacial del modelo de reconstrucción glacial y el análisis espacial/cuantitativo de los resultados. Se empleó el procesador de hojas de cálculo Excel, para realizar de un modo automatizado los cálculos requeridos por el modelo numérico. El primer paso metodológico consistió en determinar los principales rasgos de origen glacial y la delimitación de la cuenca de interés, para lo cual se definieron las paleodivisorias de hielo coincidentes con las divisorias de agua actuales. Luego se trazaron perfiles longitudinales coincidentes con el fondo del valle glacial principal y de los valles secundarios, y, sobre los mismos, se generaron puntos cada 500 m (Fig. 1 b) desde el frente del paleoglaciario (indicado por la morena frontal ubicada al este) hasta la cabecera (en el extremo oeste). Se incluyeron, además, perfiles transversales a la dirección del flujo (Fig. 1 c), calculándose para cada uno el índice o factor de forma (relaciona perímetro vs. área de la sección del cauce), el cual se obtiene de manera automática a través de herramientas de ArcGIS. Los valores obtenidos fueron asignados al punto medio de cada perfil transversal, para luego ser interpolados generando

un Modelo Digital de Terreno (MDT) que representa el factor de forma de la cuenca (Fig. 1 d). De esta manera pueden calcularse, para cada uno de los puntos generados, las variables necesarias para la aplicación del método: altitud sobre el nivel del mar, distancia al frente del paleoglaciario, y factor de forma. La altitud de las evidencias geomorfológicas (piso de los circos, piso de valles colgantes, bloques erráticos, restos de morenas laterales, entre otros) es un parámetro fundamental en la modelización pues permite, al menos, estimar la posición de la superficie superior del glaciario para una estabilización determinada. Esto exige garantizar que los mencionados rasgos glaciogénicos se corresponden con un único evento y, en el caso del presente trabajo, esto se estaría confirmando con la posición interna, dentro de la cuenca, y por la aparente buena conservación geomorfológica de los mismos. Sin embargo, se asume como necesario realizar los correspondientes controles de campo, verificaciones que no han sido realizadas en el marco del presente trabajo dado el objetivo principal del mismo.

Posteriormente se ingresó la información correspondiente a los puntos de cada perfil en el marco de la hoja *Profiler v.2.*, incorporándose las evidencias geomorfológicas (cuando se contara con ellas), introduciéndose manualmente los valores de esfuerzo de corte basal hasta lograr la mejor coincidencia entre ambos elementos (Tabla 1, Fig. 2).

**Tabla 1.** Resumen de los parámetros requeridos (Entradas) y los resultados (Salidas) de la hoja de cálculo *Profiler v.2* programada en Excel por Benn y Hulton (2010) orientada al modelado de superficies glaciales. Información parcial extraída del perfil longitudinal del valle principal analizado en el presente trabajo (Fig. 1).

ENTRADAS					SALIDAS	
Distancia al frente del glaciario (m)	Altitud (m s.n.m.)	Altitud Evidencias geomorfológicas (m s.n.m.)	Esfuerzo de corte basal (Pa)	Factor de forma	Altitud Superficie del hielo (m s.n.m.)	Espesor (m)
2734	928	1150	50000	0,76	1133	205
3234	928	1150	50000	0,77	1150	222
8234	967	1300	50000	0,69	1281	314
8734	959	1300	50000	0,68	1293	334
10234	935	1320	15000	0,64	1319	384
10734	935	1320	10000	0,64	1321	386
12234	935	1330	5000	0,64	1325	390
12734	935	1330	5000	0,64	1327	392
35734	934	1500	45000	0,61	1486	552
36234	934	1500	45000	0,60	1494	560



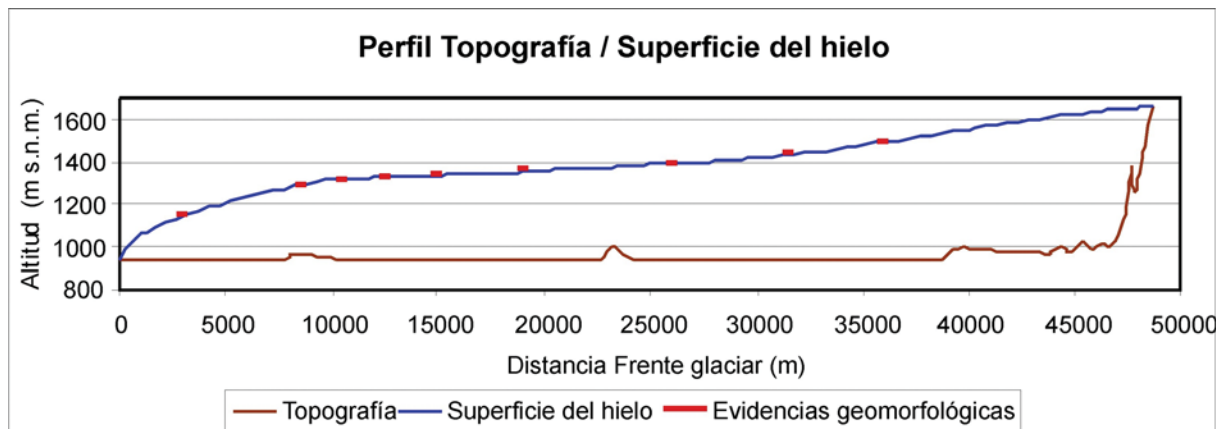


Figura 2. Sección longitudinal del glaciar de valle que ocupó la cuenca de los lagos La Plata y Fontana durante una estabilización post-MUG. Cano D. Martín, Reato Agustina, Navarro Edgardo L. y Martínez Oscar A..

La coincidencia entre la superficie del hielo (trazo azul) y las evidencias geomorfológicas (trazo rojo), se logró modificando los valores de esfuerzo de corte basal. Perfil generado en Excel a partir de datos extraídos de la Tabla 1.

Finalmente se procede a la integración (a través de la ponderación inversa a la distancia: IDW, del inglés *Inverse Distance Weighting*) del valor de altitud de la superficie paleoglacial de cada punto, para generar un nuevo MDT que representa la superficie del paleoglaciar analizado. A partir de este modelo, es posible el cálculo, mediante operadores de ArcGIS, de diferentes parámetros glaciológicos: superficie, espesor, volumen del cuerpo de hielo y paleo ALE.

## RESULTADOS

El método permitió definir el modelo tridimensional del glaciar de valle que ocupó la cuenca de los lagos La Plata y Fontana durante una estabilización post-MUG (Fig. 3 a). Del mismo se desprende que el cuerpo de hielo principal tuvo una longitud superior a los 40 km y unos 20 km de ancho, con una superficie cercana a los 730 km<sup>2</sup> y un volumen de alrededor de 165 km<sup>3</sup>. El espesor en la parte central del valle principal superaba los 706 m (Fig. 3 b), estando su superficie a una cota máxima de 1999 m s.n.m. Por otro lado, el modelo hizo posible la aplicación de métodos de cálculo de la paleo ALE que exigen contar con parámetros geométricos precisos. Los utilizados en este trabajo fueron: a) el AAR (*Accumulation Area Ratio*), el cual sostiene que en los glaciares en equilibrio existe una relación constante entre el área de acumulación y el área total, y b) el AABR (*Area Altitud Balance Ratio*), que tiene en cuenta la hipsometría del cuerpo de hielo. El cálculo fue realizado en forma automatizada a través de una herramienta específica desarrollada por Pellitero *et al.* (2015), y teniendo en cuenta la exitosa aplicación del mismo en glaciares de valle y latitudes equivalentes del hemisferio norte, llevada a cabo por Santos González (2012) en la cordillera

Cantábrica. Este autor sostiene que para glaciares de latitudes medias, el área de la zona de acumulación representa el 65% del total, es decir un AAR=0.65, y utiliza los gradientes de balance de masa BR=0.99 y BR=2.19, propuestos por Rea (2009). El valor de ALE obtenido fue de 1356 m (+/- 20 m) según los métodos AAR y AABR (Fig. 3 c).

## DISCUSIÓN

La principal ventaja de la metodología aquí aplicada con respecto a otros métodos, por ejemplo (Schilling y Hollin 1981, Nye 1952) radica en que el modelo numérico en el cual se basa permite ser ajustado por evidencias geomorfológicas (pisos de valles colgantes, bloques erráticos, morenas laterales, entre otras) que indican con bastante exactitud el espesor del paleoglaciar, mediante el ingreso del valor de esfuerzo de corte basal que se generó entre la base del mismo y el lecho rocoso. Por esta razón el método tiene limitaciones cuando es utilizado para reconstruir cuerpos de hielo tipo calota o en zonas de escaso relieve, arrasadas por el hielo (Fernández Fernández 2015). En estos casos es necesario interpolar los valores de esfuerzo de corte basal de valles aledaños que cuenten con mejor definición geomorfológica. Un factor a considerar es que diferentes valores del este parámetro pueden arrojar resultados similares en la altitud de la superficie del hielo. Cuando se trata, como en este caso, de valles glaciarios en los cuales se han desarrollado cuencas lacustres, para poder llevar a cabo la reconstrucción del paleoglaciar es necesario intentar eliminar del MDE los cuerpos de agua para así obtener la información altitudinal del fondo. La región de los lagos La Plata y Fontana, no cuenta hasta el momento con información batimétrica oficial, y por lo tanto existe un error asociado al

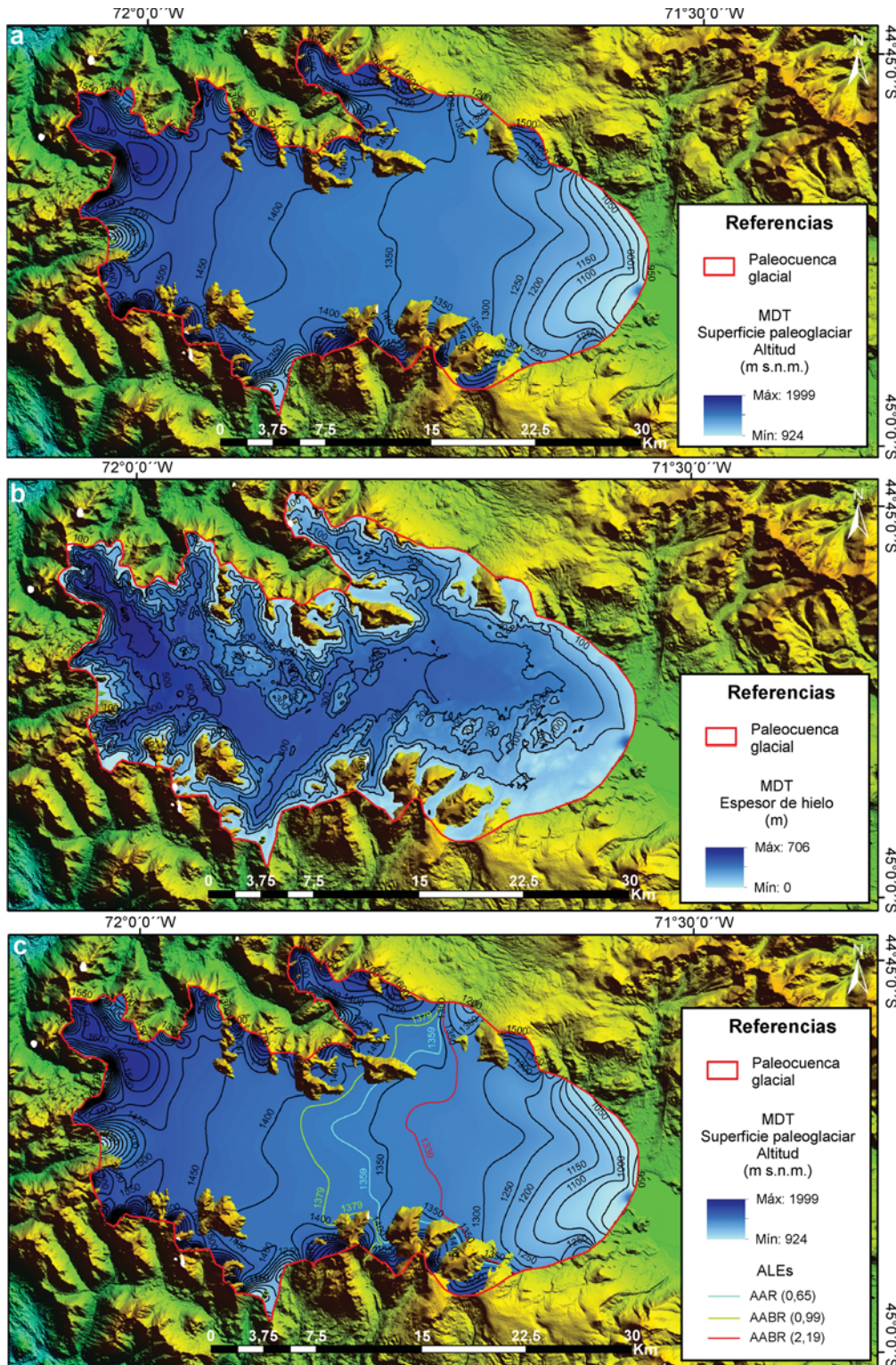


Figura 3. Resultados principales obtenidos del modelado del cuerpo de hielo desarrollado en la cuenca de los lagos La Plata y Fontana durante una estabilización post-MUG. Cano D. Martín, Reato Agustina, Navarro Edgardo L. y Martínez Oscar A..

a\_MDT que representa la superficie del paleoglacial analizado. b\_MDT que representa la distribución de los espesores de hielo. c\_Líneas de equilibrio glacial (ALE) según los métodos AAR y AABR. Base MDE ALOS 30 m.



cálculo del modelo de la superficie paleoglaciaria, que podría explicar la ubicación de mayores espesores cercanos a la cabecera del mismo. Dichas correcciones deberían realizarse de igual forma para sectores de relleno sedimentario, lo cual supondría un nuevo y adicional estudio que contemple la aplicación de métodos geofísicos.

Para verificar la validez de la metodología utilizada se ha recurrido a contrastar la altitud de la línea de nieve obtenida en este trabajo (1356 m +/- 20 m) con el valor de la misma generado por otros métodos que aun siendo menos precisos otorgan una buena aproximación de dicho parámetro: la Altura del Piso de los Circos (APC) y el de la Altura Media (AM). El primer método citado arroja una ALE de alrededor de 1500 m, es decir unos 150 m por encima del valor obtenido en el presente trabajo, lo cual es esperable ya que el mismo brinda una altitud máxima de la línea de equilibrio y representa, usualmente, el estadio inicial de la glaciación. El segundo método muestra una ALE inferior, cercana a 1300 m, muy similar a la aquí obtenida, posiblemente debido a que en ambos procedimientos se asume que la zona de alimentación se prolongó por debajo de la posición de los circos originándose una lengua glacial, cuyo extremo oriental indica el máximo de la estabilización glacial considerada.

## CONCLUSIONES

La aplicación conjunta de SIG y modelos numéricos en la reconstrucción de un paleoglaciario de valle de la vertiente oriental de la Cordillera Patagónica, en la cuenca de los lagos La Plata y Fontana, generó resultados coherentes, a la luz de las validaciones llevadas a cabo. Se puede confirmar que partiendo de un mapeo preciso de los límites de un cuerpo de hielo, es posible calcular la altitud de la línea de equilibrio y otros parámetros glaciológicos en forma automatizada y confiable. Quedan así sentadas las bases para ampliar la aplicación del método, haciéndolo extensivo a otras cuencas, con el objetivo de aportar en la reconstrucción del segmento del Manto de Hielo Patagónico que cubrió, durante el Pleistoceno tardío, la Cordillera Patagónica en la provincia del Chubut.

## LISTA DE TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

Benn, D.I. y Hulton, N.R.J. 2010. An Excel spreadsheet program for reconstructing the surface profile of former mountain glacier sand ice caps. *Computers & Geosciences*, 36: 605–610.  
Fernández Fernández, J.M. 2015. Aplicaciones de los sistemas

de información geográfica en la reconstrucción paleoglaciaria: el caso de la Sierra Segundera (Zamora, España), *GeoFocus (Artículos)*, N° 16, p. 87-118. ISSN: 1578- 5157.  
Glasser, N.F., Harrison, S., Jansson, K.N., Anderson, K. and Cowley, A. 2011. Global sea-level contribution from the Patagonian Icefields since the Little Ice Age maximum. *Nature Geosci.*, 4(5), 303–307 (doi: 10.1038/ngeo1122).  
Lapido, O.R. y Márquez, M. 1999. Hoja Geológica 4572 II/I Gobernador Costa – Chubut, 1:250.000. SEGEMAR Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 277. Buenos Aires.  
Locke, W. 1995. Modelling of icecap glaciation of the northern Rocky Mountains of Montana. *Geomorphology*, 14, pp. 123–130.  
Ng, F.S.L., Barr, I.D. y Clark, C.D. 2010. Using the surface profiles of modern ice masses to inform paleo-glacier reconstructions. *Quaternary Science Reviews*, 20, pp. 3240–3255.  
Nye, J.F. 1952. The mechanics of glacier flow. *Journal of Glaciology*, 2, pp. 82-93.  
Pellitero, R., Rea, B.R., Spagnolo, M., Bakke, J., Hughe, P., Ivy-Ochs, S., Lukas, S., Ribolini, A. 2015. A GIS tool for automatic calculation of glacier equilibrium-line altitudes. *Computers & Geosciences*, 82: 55–62.  
Ramos, V.A. 1981. Descripción geológica de la Hoja 47 ab - "Lago Fontana", provincia del Chubut: carta Geológico-Económica de la República Argentina, escala 1: 200.000. Boletín / República Argentina. Servicio Geológico Nacional, no.183.  
Rea, B.R. 2009. Defining modern day area-altitude balance ratios (AABRs) and their use in glacier-climate reconstructions. *Quaternary Science Reviews* 28, 237–248.  
Rodríguez Rodríguez, L., Domínguez Cuesta, M.J. y Jiménez Sánchez, M. 2011. Reconstrucción en 3D del máximo glaciar registrado en la cuenca del Lago de Sanabria (Noroeste de España). *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. Sec. Geol.*, 105 (1-4): 31-44.  
Ruiz, L. 2013. Análisis geomorfológico, sedimentológico y crono-estratigráfico, de depósitos glaciales, periglaciales y glaciogénicos, en la Cordillera de los Andes y zonas adyacentes entre el paralelo 42° y el 43° LS, desde la última glaciación. Text, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.  
Santos González, J. 2012. Glaciarismo y periglaciarismo en el Alto Sil, provincia de León (Cordillera Cantábrica). Universidad de León. 689 pp. España.  
Schilling, D.H. y Hollin, J. 1981. Numerical reconstructions of valley glaciers and small ice caps. Denton, G.H. y Hughes -eds.-: *Studies in the Lateglacial of North-West Europe*. Oxford, Pergamon, pp. 31-44.  
Van der Veen, C.J. 1999. *Fundamentals of Glacier Dynamics*, Rotterdam, Balkema, 462 págs.  
Vieira, G. 2008. Combined numerical and geomorphological reconstruction of the Serra da Estrela plateau icefield, Portugal. *Geomorphology*, 97, pp. 190-207.