

Balance de masa geodésico 1957-2000, 2000-2013 y 2013-2019 de los glaciares Hurd y Johnsons, Isla Livingston, Antártida

F.J. Navarro¹, C. Recio-Blitz², J. Otero¹, K. Shahateet¹, E. Berthier³, R. Rodríguez-Cielos¹, C. Molina¹, M.I. de Corcuera¹ y A. Díez-Galilea⁴

1. ETSI de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, Av. Complutense, 30, 28040 Madrid
2. Universidad Isabel I, Calle Fernán González, 76, 09003 Burgos
3. LEGOS (CNRS/IRD/UT3), 14 av. Ed. Belin, 31400 Toulouse, France
4. ETSI en Topografía, Geodesia y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid, Camino de la Arboleda s/n, 28031 Madrid

Resumen

El denominado método geodésico para el cálculo del balance de masa glaciar se basa en la sustracción de dos DEM correspondientes a sendos instantes de tiempo espaciados habitualmente entre 5 y 10 años. Combinado este cambio de volumen con una estimación de la densidad, se obtiene el cambio de masa durante el periodo entre los dos DEM. Hemos realizado este cálculo para los glaciares Hurd y Johnsons, en Isla Livingston (Islas Shetland del Sur, Antártida), usando DEM correspondientes a 1957 (basado en fotogrametría aérea), 2000 (topografía clásica y medidas GNSS diferencial), 2013 (GNSS diferencial) y 2019 (imágenes ópticas de alta resolución del satélite Pléiades). Esto nos ha permitido analizar la evolución del balance de masa geodésico de estos glaciares en los periodos 1957-2000, 2000-2013 y 2013-2019, obteniendo, respectivamente, balances específicos (por metro cuadrado) de $-0,27 \pm 0,09$, $-0,21 \pm 0,08$ y $0,12 \pm 0,07$ m w.e./a (glaciar Hurd) y de $-0,16 \pm 0,09$, $-0,14 \pm 0,10$ y $0,01 \pm 0,14$ m w.e./a (glaciar Johnsons). Puede observarse una tendencia a balances menos negativos e incluso positivos entre los distintos periodos. Esto se debe a que la zona norte de la Península Antártica y las Islas Shetland del Sur ha experimentado durante las dos primeras décadas del siglo XXI un enfriamiento bastante sostenido y particularmente intenso entre los años 2010 y 2016, que contrasta con el calentamiento bastante generalizado en el resto del planeta (y en esta región en décadas anteriores).

Palabras clave:

DEM, fotogrametría, GNSS, sensores remotos, Pléiades, Islas Shetland del Sur

INTRODUCCIÓN

Uno de los mayores impactos del cambio climático actual es el aumento del nivel del mar debido, fundamentalmente, a la fusión de los glaciares y mantos del hielo y a la expansión térmica del océano. La contribución actual por parte de los glaciares de la periferia antártica es relativamente pequeña (Hugonnet et al., 2021), pero las proyecciones de su contribución hasta finales del siglo XXI muestran un aumento substancial (Edwards et al., 2021). La mayoría del área glaciada (63%) de la periferia antártica está situada en la región de la Península Antártica, en la que se observó una de las mayores tasas de calentamiento del globo durante la segunda mitad del siglo XX (Turner et al., 2005). Sin embargo, Turner et al. (2016) identificaron un cambio de tendencia, de calentamiento a un ritmo de $0.32^{\circ}\text{C}/\text{década}$ durante 1979-1997 a enfriamiento a un ritmo de $-0.47^{\circ}\text{C}/\text{década}$ durante 1999-2014. Oliva et al. (2017) mostraron que este enfriamiento reciente ha sido más significativo en el N y NE de la Península Antártica y en las Islas Shetland del Sur,

con cambios de temperatura media de verano del orden de -0.5°C entre las décadas 1996-2005 y 2006-2015. Estos autores también mostraron que este enfriamiento regional ha tenido impactos observables en la criosfera, incluyendo ralentización en la recesión de los glaciares, cambio de balances de masa en superficie de los glaciares periféricos antárticos de ligeramente negativo (pérdidas de masa) a ligeramente positivos (ganancias de masa) y, en las Islas Shetland del Sur, también un alargamiento de la duración de la cobertura nival y un adelgazamiento de la capa activa del permafrost. Carrasco et al. (2021) han sugerido que esta tendencia al enfriamiento ha llegado a su fin a partir de mediados de la década 2010-2020.

Este comportamiento anómalo del clima regional, en un contexto de calentamiento climático global, justifica el interés del análisis del balance de masa geodésico de los glaciares Hurd y Johnsons, en Isla Livingston (Islas Shetland del Sur), que se lleva a cabo en este artículo y que cubre periodos previo y simultáneos al de enfriamiento regional. El hecho de que el glaciar Hurd termine en tierra, mientras que el glaciar Johnsons termina en mar, proporciona un valor añadido a este estudio, ya que ambos tipos de glaciares presentan respuestas dinámicas diferentes frente a los cambios en las condiciones ambientales.

MATERIAL Y MÉTODOS

Uno de los métodos más habituales para el cálculo del balance de masa total de los glaciares es el denominado método geodésico (Cogley et al., 2011). Consiste en calcular la diferencia de volumen del glaciar entre dos momentos distintos, habitualmente separados entre sí unos 5–10 años, mediante la diferencia de dos DEM del glaciar para esos dos instantes de tiempo. Usando una estimación de la densidad del material perdido o ganado, convertimos este cambio de volumen en cambio de masa. Hemos realizado este cálculo para los glaciares Hurd y Johnsons, en Isla Livingston, usando DEM correspondientes a los años 1957 (obtenido mediante restitución de fotos aéreas), 2000 (obtenido a partir de medidas topográficas clásicas –teodolito más distanciómetro laser– y medidas GNSS diferencial sobre el glaciar), 2013 (obtenido a partir de medidas GNSS diferencial sobre el glaciar) (Molina et al., 2007; Rodríguez-Cielos, 2014; Recio-Blitz, 2019) y 2019 (obtenido a partir de imágenes ópticas de alta resolución del satélite Pléiades). Este último es el exclusivo de este trabajo.

El par de imágenes de Pléiades utilizado fue el AS_FC_181987_2_270, del satélite PHR1A, de fecha 2019-02-28, con ángulos de incidencia de 24.09° (combinado), -20.31° (cabeceo, *roll*), -14.09° (alabeo, *pitch*) y 25.29° (combinado), 19.41° (cabeceo), 17.47° (alabeo), y con 0% de cobertura de nubes en ambos casos. Los detalles de la técnica de procesado pueden encontrarse en Berthier et al. (2014). El DEM fue ajustado usando 6 puntos de control sobre el terreno y validado en 43 puntos sobre la superficie del glaciar, todos ellos medidos con técnica GNSS diferencial.

La disponibilidad de estos DEM nos ha permitido analizar la evolución del balance de masa geodésico de estos glaciares en los periodos 1957-2000, 2000-2013 y 2013-2019.

El hecho de disponer además de medidas de balance de masa en superficie para ambos glaciares desde el año hidrológico (del hemisferio sur) 2002 hasta la actualidad, así como una estimación de las pérdidas de masa por *calving* (desprendimiento de icebergs) del glaciar Johnsons (recordemos que este glaciar termina en mar, mientras que el glaciar Hurd termina en tierra) nos ha permitido asimismo comparar el balance de masa total calculado con el método geodésico con el balance de masa en superficie (en el caso del glaciar Hurd) y el de superficie menos las pérdidas de masa por *calving* (en el caso del glaciar Johnsons).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los balances de masa geodésicos obtenidos para los glaciares Johnsons y Hurd en los periodos 1957-2000, 2000-2013 y 2013-2019, expresados como balances específicos (por metro cuadrado), son, respectivamente, de $-0,27 \pm 0,09$, $-0,21 \pm 0,08$ y $0,12 \pm 0,07$ m w.e. a^{-1} (para el glaciar Hurd) y de $-0,16 \pm 0,09$, $-0,14 \pm 0,10$ y $0,01 \pm 0,14$ m w.e. a^{-1} (para el glaciar Johnsons) (w.e. = water equivalent). Puede observarse una tendencia a balances menos negativos e incluso positivos entre los distintos periodos. Esto se debe a que, como hemos comentado en la Introducción, la zona norte de la Península Antártica y las Islas Shetland del Sur, si bien durante la segunda mitad del siglo XX experimentó uno de los calentamientos mas fuertes del planeta (Turner et al., 2005), en las dos primeras décadas del siglo XXI experimentó un enfriamiento bastante sostenido y particularmente intenso entre los años 2010 y 2016 (Turner et al., 2016; Oliva et al., 2017).

La distribución espacial de los cambios de masa durante los periodos analizados no ha sido uniforme, sino que ha seguido los patrones mostrados en las figuras 1 y 2, que recogen los cambios de espesor de los glaciares durante los mencionados periodos.

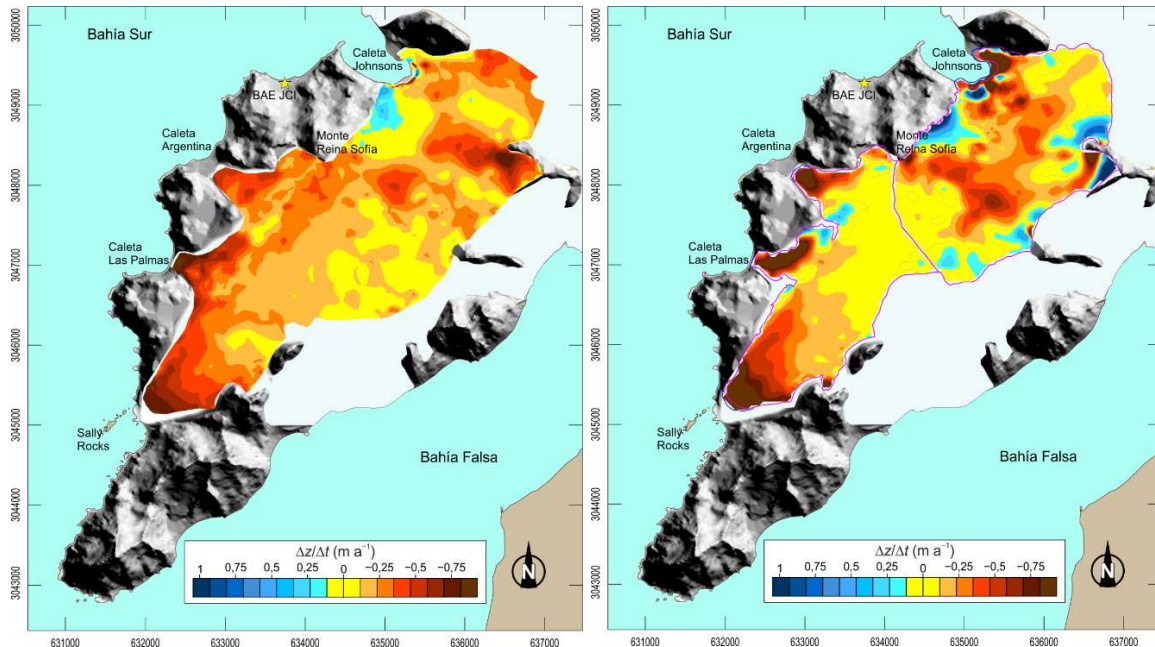


Fig. 1. Mapas de la tasa de cambio en la elevación de la superficie de los glaciares Hurd y Johnsons a lo largo de los periodos diciembre 1957-diciembre 2000 (izquierda) y diciembre 2000-febrero 2013 (derecha).

En la figura derecha se muestra además la posición de los frentes en 2001 (azul) y 2013 (magenta), así como la línea divisoria entre ambos glaciares (también en magenta). Figuras modificadas a partir de la Fig. 4 de Molina et al. (2007) y la Fig. 5.14 de Recio-Blitz (2019), respectivamente.

En la Fig. 1 se observa que las mayores pérdidas corresponden a las zonas de los frentes con terminación en tierra (frentes de Caleta Argentina, Caleta Las Palmas y Sally Rocks del glaciar Hurd, aunque también en el frente del glaciar Johnsons en la caleta del mismo nombre) y que las zonas altas del glaciar son relativamente estables (especialmente en 2000-2013). Se observa asimismo una ralentización de las pérdidas entre los periodos 1957-2000 y 2000-2013. En este último se aprecian zonas del glaciar con ganancia de masa (tonos azules), en particular en la parte alta del glaciar Johnsons. En la Fig. 2, en contraste, se observan para el periodo 2013-2019 abundantes zonas de ganancia de masa (tonos azules) y pérdidas de masa en los frentes del glaciar Hurd mucho más moderadas que en

periodos anteriores. La fuerte pérdida de masa que se observa en el frente del glaciar Johnsons corresponde realmente a un retroceso de su frente con terminación marina. Nótese que el periodo 2013-2019 abarca buena parte del periodo de mayor enfriamiento regional, el 2010-2016.

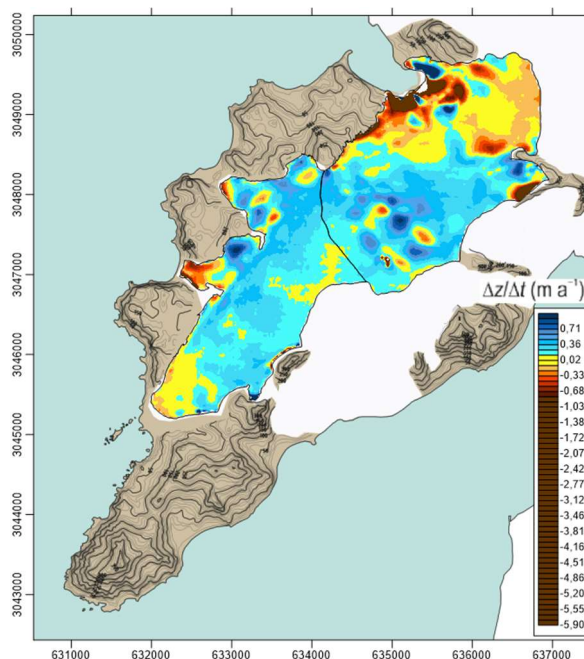


Fig. 2. Mapa de la tasa de cambio en la elevación de la superficie de los glaciares Hurd y Johnsons a lo largo del periodo febrero 2013-febrero 2019. La escala de colores se corresponde aproximadamente con la de la Fig. 1, pero ha sido ampliada en los colores más cálidos para mostrar las mayores pérdidas de masa en el frente del glaciar Johnsons, que en buena parte corresponden al retroceso del frente del glaciar Johnsons, que termina en mar.

Según hemos destacado al final de la sección de Materiales y Métodos, el hecho de disponer adicionalmente de medidas de balance de masa en superficie para ambos glaciares desde el año hidrológico 2002 hasta la actualidad, así como contar con una estimación de las pérdidas de masa por *calving* del glaciar Johnsons, nos permite efectuar una estimación independiente del balance de masa total de ambos glaciares, que podemos comparar con la obtenida por el método geodésico en los dos periodos más recientes analizados. Los resultados obtenidos por ambos métodos están generalmente dentro de los márgenes de error de las observaciones experimentales, lo que da soporte a la validez de los resultados obtenidos mediante dos técnicas totalmente independientes. No obstante, esta cuestión está pendiente de un análisis más detallado, que será presentado en un trabajo posterior.

En conclusión, tras un periodo de fuerte calentamiento regional en la zona norte de la Península Antártica y las Islas Shetland del Sur, que resultó en pérdidas de masa glaciar notables, se produjo un enfriamiento regional al inicio del siglo XXI que ha llevado consigo una ralentización notable de las pérdidas, incluso con ligeras ganancias en determinados años. Sin embargo, todo parece indicar que de 2017 en adelante se ha vuelto a una senda de calentamiento y pérdidas de masa glaciar. Análisis similares a los llevados a cabo en este estudio, para periodos posteriores, permitirán cuantificar la magnitud de tales pérdidas de masa.

Agradecimientos

Imágenes Pléiades utilizadas para el DEM de 2019 cortesía de Airbus Defence and Space 2019. Investigación financiada por Agencia Estatal de Investigación, proyectos CTM2017-84441-R y PID2020-113051RB-C31.

Referencias

Berthier E., Vincent C., Magnússon E., Gunnlaugsson Á. Þ., Pitte P., Le Meur E., Masiokas M., Ruiz L., Pálsson F., Belart J. M. C. and Wagnon P. 2014. Glacier topography and elevation changes derived from Pléiades sub-meter stereo images. *Cryosphere*, 8(6): 2275-2291, doi:10.5194/tc-8-2275-2014.

Carrasco, J.F., Bozkurt, D. and Cordero, R.R. 2021. A Review of the Observed Air Temperature in the Antarctic Peninsula. Did the Warming Trend Come Back after the Early 21st Hiatus? *Polar Sci.* 2021, July 2020,100653, doi:10.1016/j.polar.2021.100653.

Cogley, J.G., Hock, R., Rasmussen, L.A., Arendt, A.A., Bauder, A., Braithwaite, R.J., Jansson, P., Kaser, G., Möller, M., Nicholson, L. and Zemp, M. 2011. Glossary of Glacier Mass Balance and Related Terms. IHP-VII Technical Documents in Hydrology No. 86, IACS Contribution No. 2, UNESCO-IHP, Paris.

Edwards, T. L. and 83 others. 2021. Projected Land Ice Contributions to Twenty-First-Century Sea Level Rise. *Nature*, 593(7857):74–82, doi:10.1038/s41586-021-03302-y.

Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., Farinotti, D., Huss, M., Dussailant, I., Brun, F. and Käab, A. 2021. Accelerated Global Glacier Mass Loss in the Early Twenty-First Century. *Nature*, 592(7856):726–731, doi:10.1038/s41586-021-03436-z.

Molina, C., Navarro, F.J., Calvet, J., García-Sellés, D. and Lapazaran, J.J. 2007. Hurd Peninsula glaciers, Livingston Island, Antarctica, as indicators of regional warming: ice-volume changes during the period 1956-2000. *Ann. Glaciol.*, 46:43-49, doi:10.3189/172756407782871765.

Oliva, M., Navarro, F., Hrbáček, F., Hernández, A., Nývlt, D., Pereira, P., Ruiz-Fernández, J. and Trigo, R. 2017. Recent regional cooling of the Antarctic Peninsula and its impacts on the cryosphere. *Sci. Total Environ.*, 580:210-223, doi:10.1016/j.scitotenv.2016.12.030.

Recio-Blitz, C. 2019. Balance de masa reciente y dinámica de los glaciares de la Península Hurd (Isla Livingston, Antártida) en un contexto de clima cambiante. Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid.

Rodríguez-Cielos, R. 2014. Integración de modelos numéricos de glaciares y procesamiento de datos de georradar en un sistema de información geográfica. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.

Turner, J., Colwell, S.R., Marshall, G.J., Lachlan-Cope, T.A., Carleton, A.M., Jones, P.D., Lagun, V., Reid, P.A. and Iagovkina, S. 2005. Antarctic Climate Change during the Last 50 Years. *Int. J. Climatol.*, 25(3):279–294, doi:10.1002/joc.1130.

Turner, J., Lu, H., White, I., King, J.C., Phillips, T., Hosking, J.S., Bracegirdle, T.J., Marshall, G.J., Mulvaney, R., Deb, P. 2016. Absence of 21st Century Warming on Antarctic Peninsula Consistent with Natural Variability. *Nature*, 535(7612):411–415, doi:10.1038/nature18645.