

Primeras mediciones de isótopos estables de agua y su comportamiento en fiordos de los Campos de Hielo Patagónico Sur, Chile

First measurements of water stable isotopes and their behavior in fjords of the Southern Patagonian Icefield, Chile

Cristián Rodrigo^{1*}, Daniel López¹, Erick Cifuentes² y Francisco Fernandoy¹

¹Geología, Facultad de Ingeniería, Universidad Andres Bello, Quillota 980, Viña del Mar, Chile

²Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Química, Universidad de Concepción, Víctor Lamas 1290, Concepción, Chile

*Autor corresponsal: cristian.rodrigo@unab.cl

Abstract. Stable isotope measurements of seawater from fjords in the Southern Patagonian Icefields area are presented for the first time. Stable water isotope variability was associated with physiographic and oceanographic factors. Isotope depletion and lower salinity were observed at lower depths, which is consistent with shallow estuarine waters. At greater depths, the characteristics of the modified Subantarctic water mass are inferred, and the glacier proximity and temperature do not show a clear relationship with the isotopic contents. These results could be a robust basis for a possible new proxy associated with changes in water masses, freshwater mixing, and paleoclimatic studies.

Key words: Stable isotope, seawater analysis, fjord, Patagonia

INTRODUCCIÓN

Las aguas interiores (canales y fiordos) de la Patagonia, se caracterizan por la interacción con aguas dulces provenientes de los ríos y glaciares adyacentes, las que a su vez tienen una relación directa con las precipitaciones. De este modo, el clima ejerce un rol fundamental en la composición de las aguas y éstas a su vez en las variaciones biogeoquímicas, por lo tanto, los análisis isotópicos pueden aportar al conocimiento de la evolución de los sistemas biológicos en función de las variaciones climáticas debido a su sensibilidad durante diversos procesos ambientales (e.g., Rebolledo *et al.* 2008, Aracena *et al.* 2011). El análisis de isótopos estables en la oceanografía patagónica chilena ha avanzado significativamente en las últimas décadas, contribuyendo al entendimiento de procesos biogeoquímicos y abriendo nuevas interrogantes asociadas a los cambios en la productividad marina, cadena trófica, flujos de materia orgánica, entre otros, basadas principalmente en el análisis de isótopos de carbono y nitrógeno (e.g., Vargas *et al.* 2011, Rebolledo *et al.* 2019).

En el área de los Campos de Hielo Patagónico Sur (CHPS) se ha determinado el aumento de la temperatura del aire y la disminución de las precipitaciones (Carrasco *et al.* 1998, Sauter 2020), generando un retroceso sistemático de los glaciares y un aumento del caudal de agua por

derretimiento que desemboca hacia el mar (e.g., Braun *et al.* 2019, Dussallant *et al.* 2019). Lo anterior, ejercería un impacto en los ecosistemas de fiordos, situación aún no bien comprendida. Un método tradicionalmente empleado para estudios glaciológicos e hidrológicos es a través del estudio de la composición de isótopos de agua hidrógeno (²H) y oxígeno (¹⁸O) ya que su fraccionamiento se asocia a fenómenos de condensación, evaporación y precipitaciones (Hoefs 2009), dentro de la dinámica atmosférica océano-continente, siendo útiles para establecer el origen de las aguas continentales y como indicadores en estudios paleoclimáticos (Fernandoy *et al.* 2018). Sin embargo, en la región de los CHPS los estudios isotópicos son escasos (Schwikowski *et al.* 2013, Sauter 2020).

Considerando la falta de datos isotópicos en la región y la búsqueda de indicadores indirectos o *proxies* adecuados para estudios paleoclimáticos, el objetivo de este estudio fue determinar, por primera vez, la composición de isótopos estables en la columna de agua de fiordos para identificar si las aguas de fusión de glaciares u otras fuentes en el subfondo marino, están asociadas a la contracción del CHPS. Lo anterior contribuirá a la comprensión de la evolución glacial y su impacto en la hidrología, procesos sedimentarios y los ciclos biogeoquímicos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Durante el crucero oceanográfico CIMAR 23F, realizado entre el 20 de octubre y 17 de noviembre de 2017, a bordo del buque AGS “Cabo de Hornos” se estudiaron diferentes canales y fiordos adyacentes a los CHPS, en la Patagonia chilena. El área de estudio se enmarcó entre los 74°30' y 73°35' O, y los 48° y 51° S, e incluyó seis fiordos, desde el más septentrional, el fiordo Steel, hasta el fiordo Amalia, en el límite sur de los CHPS. Se obtuvo un total de 33 muestras de agua, recolectadas en 11 estaciones y a 3 niveles de profundidad: superficial, intermedio (~50 m de profundidad) y profundo (~100 m, pero variable según la profundidad máxima del fiordo). Se determinaron las variables isotópicas de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en 7 estaciones oceanográficas (Fig. 1a). Las muestras de agua se obtuvieron con el sistema de roseta del buque, compuesto por botellas Niskin estándar. Posteriormente, el agua fue almacenada en frascos de plástico y refrigerada a ~4 °C. También, se obtuvieron datos *in situ* de temperatura y salinidad del agua de mar con el CTD del buque (SeaBird SBE-19). En el laboratorio, las muestras se filtraron manualmente utilizando una jeringa de 50 mL y un filtro Pirinola de celulosa mixta (MCM) (Agela®) de 25 mm de diámetro y 0,22 μm de tamaño de

poro, se recuperó 1 mL con una micropipeta Eppendorf® de regulación móvil entre 0,1 y 1 mL y se depositó en viales cromatográficos de vidrio de 2 mL (ThermoFisher Scientific®). Los viales fueron previamente tratados con agua desmineralizada y posteriormente secados a 60 °C en un horno Memmert®. El análisis de las muestras se realizó por espectroscopía láser con un equipo de marca “Los Gatos Research” (LGR) modelo T-LWIA-45-EP en el Laboratorio de Análisis Isotópico de la Universidad Andrés Bello, sede Viña del Mar, Chile. Los resultados isotópicos son reportados según la notación $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, de acuerdo con su desviación de la razón isotópica ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ y D/H) respecto a la escala de normalización internacional VMSOW-SLAP (Vienna Standard Mean Ocean Water-Standard Light Antarctic Precipitation). El error analítico máximo aceptado fue de $\pm 0,2\text{‰}$ para el $\delta^{18}\text{O}$ y de $\pm 0,8\text{‰}$ para el $\delta^2\text{H}$.

El comportamiento isotópico se analizó en base a la relación lineal de ambos isótopos definida por la ecuación expresada en la gráfica de la Figura 2. Esta relación isotópica ($\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$) refleja diversos procesos del ciclo hidrológico como la evaporación y re-evaporación, precipitación, acumulación de capas nivales, entre otros (Clark & Fritz 1997). Esta línea fue determinada inicialmente para

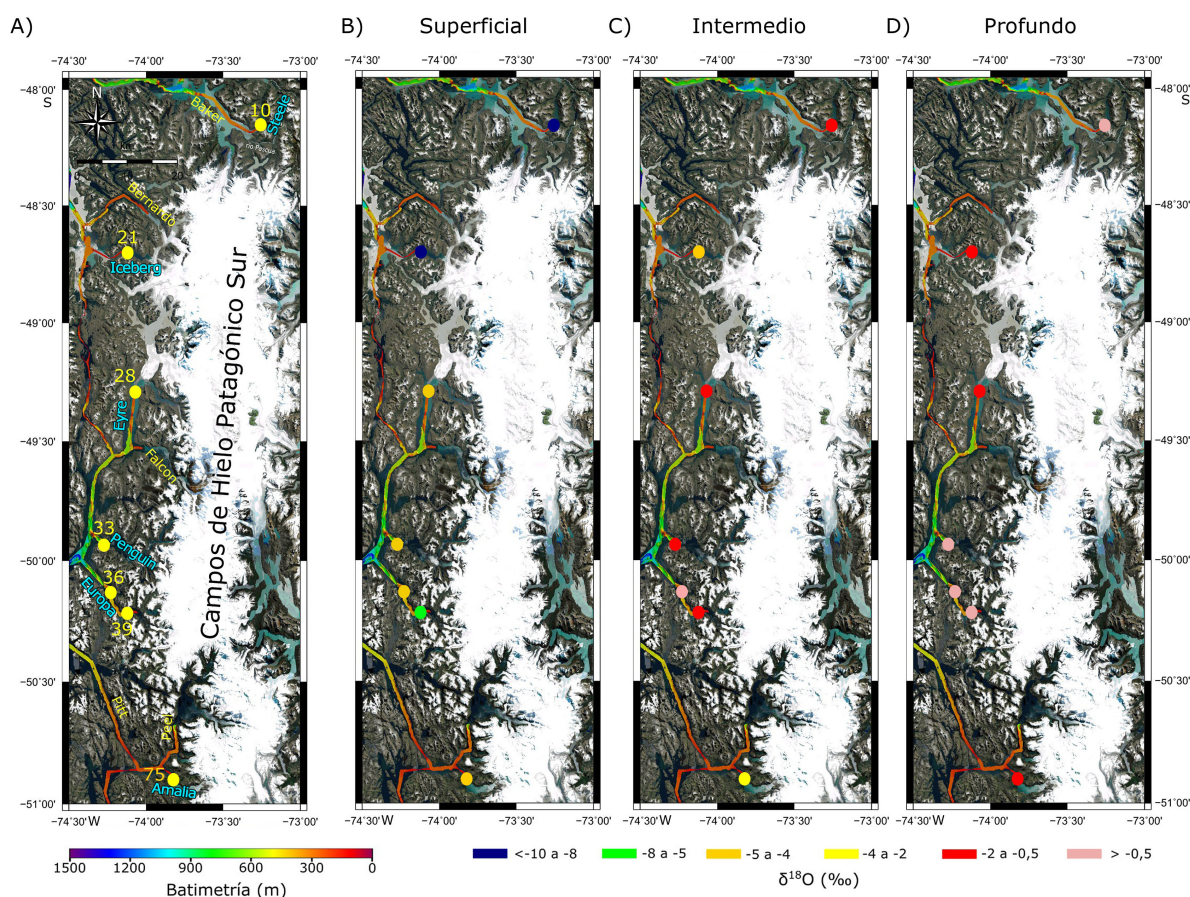


Figura 1. Área de estudio en los fiordos adyacentes a Campos de Hielo Patagónico Sur (CHPS) y variaciones de $\delta^{18}\text{O}$ en ‰-VSMOW. A) Estaciones oceanográficas (círculos amarillos) y batimetría obtenida durante el crucero CIMAR 23F en 2017 a bordo del buque AGS “Cabo de Hornos”. B-D) Resultados isotópicos para el nivel superficial (0 m), intermedio (50 m) y profundo (> 90 m) / Study area in the Southern Patagonian Ice Fields and variations of $\delta^{18}\text{O}$ in ‰-VSMOW. A) Oceanographic stations (yellow circles) and bathymetry obtained during the CIMAR 23F cruise in 2017 aboard the vessel AGS “Cabo de Hornos”. B-D) Isotopic results for the surface (0 m), intermediate (50 m) and deep level (> 90 m)

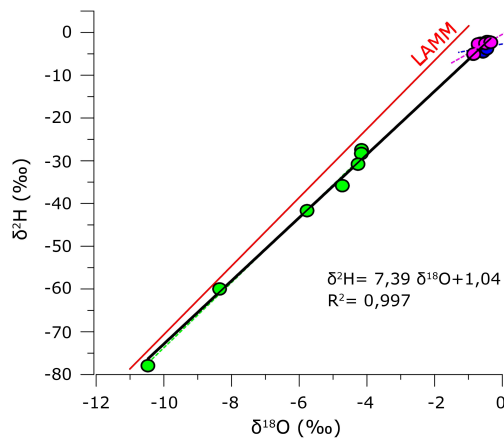


Figura 2. Isótopos de $\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^2\text{H}$ (o δD) relativos a VSMOW, obtenidos en este estudio (círculos). Con círculos verdes, en nivel de profundidad superficial; círculos azules, nivel intermedio; y círculos violeta, profundo. La ecuación lineal del ajuste de los datos se muestra en el costado inferior derecho y además se presenta como referencia la línea de aguas meteóricas mundial (LMM) / Isotopes of $\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta_2\text{H}$ (or δD) relative to VSMOW, obtained in this study (circles). With green circles, at shallow depth level; blue circles, intermediate level; and violet circles, deep. The linear equation for data fit is shown in the lower right side, and the global meteoric water line (GMWL) is also presented as a reference

precipitaciones frescas y denominada “línea de aguas meteóricas global” (GMWL) por Craig (1961). Debido a la relación lineal entre ambos isótopos, ambos pueden usarse como equivalente del otro de acuerdo con la ecuación definida anteriormente. De esta forma, se consideró como base del análisis el comportamiento del isótopo $\delta^{18}\text{O}$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de las mediciones isotópicas de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ de las muestras de agua de mar de los distintos fiordos y niveles de profundidad se presentan en la Tabla 1. Los valores fluctuaron entre -10,5 y -0,4‰, para el $\delta^{18}\text{O}$, y entre -77,8 y -2,3‰, para el $\delta^2\text{H}$. La Figura 1 presenta las variaciones del contenido isotópico en función de la localización de las estaciones de muestreo en el área de estudio y a distintos niveles de profundidad, donde se observó un enriquecimiento isotópico general a mayores profundidades. Esto se debe a que, en los niveles más profundos, domina la influencia de las masas de agua oceánica, en este caso, la masa de agua Subantártica (ASAA) (Sievers *et al.* 2002), por lo que las desviaciones isotópicas tienden a valores cercanos a cero. Comparando las fluctuaciones isotópicas para el ASAA formada en el Frente Subantártico (FSA) del paso Drake, que varían entre -0,1 y -0,2‰ de $\delta^{18}\text{O}$ (Meredith *et al.* 1999), se encuentra que esos valores se muestran un poco más enriquecidos que la de los fiordos en profundidad (entre -0,7 y -0,4‰), lo cual podría explicarse por procesos de mezcla local con agua estuarina (AE), conformando una ASAA modificada (Sievers *et al.* 2002). Adicionalmente, se destaca el comportamiento de las desviaciones isotópicas de los fiordos para niveles profundos, donde éstas se agrupan y alejan de la línea de aguas meteóricas mundial (LMM) (Fig. 2). Similar comportamiento fue descrito por Muñoz *et al.* (2014) en aguas profundas del fiordo Comau en Patagonia Norte, lo que sumado a la desviación

Tabla 1. Estaciones de muestreo y resultados isotópicos relativos al VSMOW / Sampling station and isotopic results VSMOW relative

Estación	Fiordo	Prof. (m)	Lat. (°)	Long. (°)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)
10	Steele	0	-48,1557	-73,2633	-77,8	-10,5
		50	-48,1557	-73,2633	-3,7	-0,5
		100	-48,1557	-73,2633	-2,4	-0,4
21	Iceberg	0	-48,7022	-74,1248	-59,9	-8,4
		50	-48,7022	-74,1248	-33,3	-4,7
		100	-48,7022	-74,1248	-2,7	-0,7
28	Eyre	0	-49,2959	-74,0718	-35,9	-4,7
		50	-49,2959	-74,0718	-2,8	-0,7
		130	-49,2959	-74,0718	-3,3	-0,6
33	Penguin	0	-49,9302	-74,2801	-27,5	-4,2
		50	-49,9302	-74,2801	-4,6	-0,6
		300	-49,9302	-74,2801	-2,3	-0,5
36	Europa	0	-50,126	-74,2251	-28,4	-4,2
		50	-50,126	-74,2251	-3,9	-0,5
		220	-50,126	-74,2251	-2,7	-0,5
39	Europa	0	-50,2158	74,129	-41,7	-5,8
		50	-50,2158	74,129	-3,8	-0,7
		100	-50,2158	74,129	-2,5	-0,4
75	Amalia	0	-50,9061	-73,8269	-30,9	-4,3
		10	-50,9061	-73,8269	-19,8	-3,0
		90	-50,9061	-73,8269	-5,2	-0,9

LMM, confirma la cercanía hacia los valores de referencia del agua de mar estándar (0‰). Por otro lado, las aguas superficiales tendieron a ser más empobrecidas (entre -10,5 y -4,2‰), siendo consistente con la influencia de aguas estuarinas, pero con una variación mucho más evidente que el observado de las aguas profundas (Fig. 2). De este modo, las variaciones pueden reflejar diferencias en la entrada de agua dulce y de mezcla vertical (Whitney *et al.* 2020). En las Figuras 1 y 3, se observa que las muestras más empobrecidas se presentaron en la parte norte del área

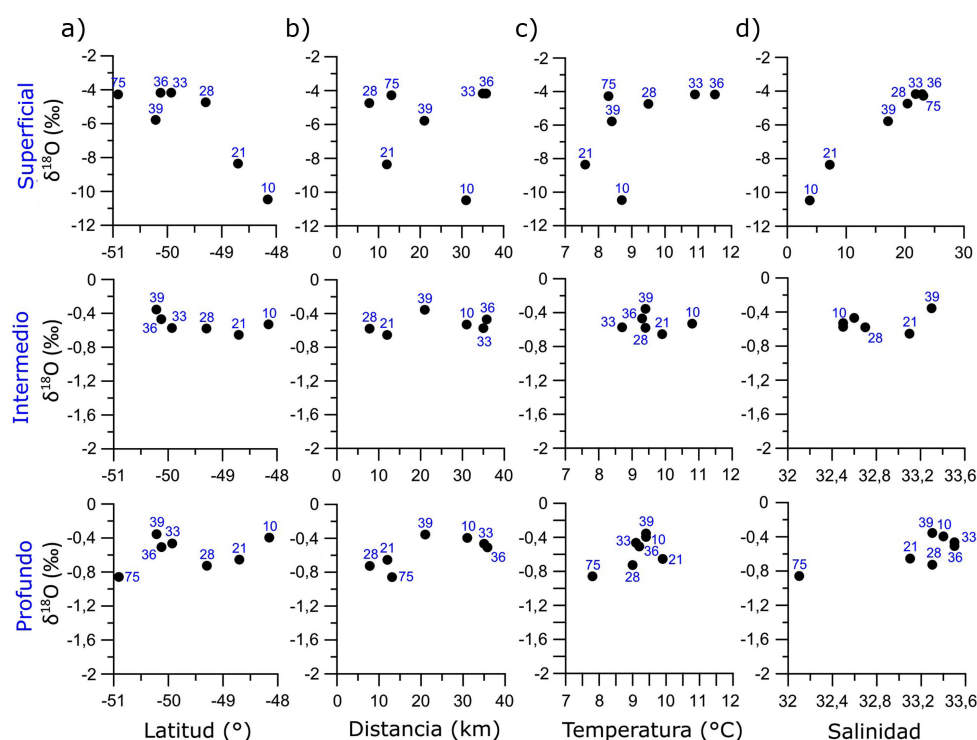


Figura 3. Isótopos de $\delta^{18}\text{O}$ relativos a VSMOW en función de diversas variables y niveles de profundidad (superficial, intermedio y profundo). a) en función de la latitud. b) en función de la distancia al frente glaciar más próximo. c) en función de la temperatura del agua de mar *in situ*. d) en función de la salinidad del agua de mar *in situ* / Isotopes of $\delta^{18}\text{O}$ relative to VSMOW as a function of various variables and depth levels (superficial, intermediate and deep). a) based on latitude. b) depending on the distance to the nearest glacier front. c) depending on *in situ* seawater temperature. d) depending on *in situ* seawater salinity

de los CHPS, especialmente en las muestras superficiales (Fig. 3a), lo que es contrario con lo descrito a nivel global, cuya relación sostiene que a mayor latitud debería existir un mayor empobrecimiento (Clark & Fritz 1997). Esta tendencia latitudinal contraria, podría estar relacionada con la variación de la salinidad, dado que los valores más empobrecidos se correlacionan con las menores salinidades (Fig. 3d), siendo un factor local importante, considerando un clima relativamente homogéneo dentro del sector (a lo menos en precipitaciones) (Carrasco *et al.* 2002). El bajo valor isotópico en superficie en el fiordo Steel (-10,5‰), se condice con la presencia del río Pascua (Fig. 1), el cual es el más caudaloso comparado con los demás sitios del área de estudio (Barría 2010). Por otro lado, aunque la distancia al frente glaciar para niveles intermedios y profundos no pareció tener una mayor influencia en las desviaciones isotópicas (Fig. 3b), se observó una leve tendencia para las muestras superficiales donde, a mayor distancia al frente glaciar, el enriquecimiento es mayor (estaciones 21, 39, 33 y 36), la que además se corresponde con la tendencia al aumento de la temperatura y salinidad también a mayores distancias del término glaciar (Fig. 3c y d). De la tendencia anterior, aquellas muestras obtenidas más cercanas al glaciar muestran valores similares (entre \sim 6‰ a \sim 8,4‰ de $\delta^{18}\text{O}$) a los reportados por Negri *et al.* (2018), quienes analizaron aguas superficiales de algunos fiordos de Patagonia Norte, donde existe una mayor influencia de ríos que de glaciares de marea. A pesar de que en los valores

isotópicos de los niveles más profundos no se observó una dependencia isotópica clara con los factores presentados (distancia al frente glaciar, temperatura y salinidad), se encontraron algunas variaciones y tendencias hacia el empobrecimiento isotópico que, para ser explicadas, sería necesario disponer de más datos en los mismos sitios y en otros como referencia. Sin embargo, se sugiere que estas variaciones en aguas profundas podrían estar asociadas a intensificaciones locales de procesos glaciomarineros, así como la prolongación de plumas de sedimentos desde el frente glaciar o bien por mayor flujo subglacial asociados al retroceso glaciar y variaciones climáticas en el tiempo (Rodrigo *et al.* 2016, 2021).

Estos resultados isotópicos constituyen los primeros de su tipo para esta región de los CHPS y proporcionan información actual sobre las variaciones isotópicas en aguas de fiordos, las cuales pueden relacionarse con variaciones en el ingreso de agua dulce continental, ya sea por ríos o por derretimiento glaciar, así como el ingreso de masas de aguas oceánicas y procesos de mezcla vertical. Por lo tanto, pueden constituir las bases para el desarrollo de un nuevo indicador (*proxy*) relacionado con las variaciones isotópicas en la columna de agua y en el agua intersticial de sedimentos del fondo del mar, para establecer tendencias pasadas y futuras del cambio climático y oceanográfico. Para lograr lo anterior, se requiere un muestreo mayor y sistemático con una adecuada distribución temporal y espacial.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento del programa CIMAR 23 del Comité Oceanográfico Nacional, y Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, a los proyectos CONA C23F17-07 y C23F17-05. Agradecimientos especiales al comandante y tripulación 2017 del AGS “Cabo de Hornos”, así también a Nicolás Philippi y Stefano Pontarelli por el muestreo realizado a bordo; a Ximena Contardo y Rodrigo Fernández por su colaboración, así también al editor y los revisores anónimos.

LITERATURA CITADA

- Aracena C, CB Lange, JL Iriarte, L Rebolledo & S Pantoja. 2011.** Latitudinal patterns of export production recorded in surface sediments of the Chilean Patagonian fjord (41-55°S) as a response to water column productivity. *Continental Shelf Research* 31: 340-355.
- Barría P. 2010.** Pronóstico de caudales medios mensuales en las cuencas de los ríos Baker y Pascua. Memoria para Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Santiago, 156 pp.
- Braun MH, P Malz, C Sommer, D Farías-Barahona, T Sauter, G Casassa, A Soruco, P Skvarca & TC Seehaus. 2019.** Constraining glacier elevation and mass changes in South America. *Nature Climate Change* 9: 130-136.
- Carrasco J, G Casassa & A Rivera. 1998.** Climatología actual del Campo de Hielo Sur y posibles cambios por el incremento del efecto invernadero. *Anales del Instituto de la Patagonia* 26: 119-128.
- Carrasco JF, G Casassa & A Rivera. 2002.** Meteorological and climatological aspects of the Southern Patagonia Icefield. In: Casassa G, F Sepúlveda & RM Sinclair (eds). *The Patagonian Icefields: A unique natural laboratory for environmental and Climate Change studies*, pp. 29-41. Academic/Plenum Publishers, New York.
- Clark ID & P Fritz. 1997.** Environmental isotopes in hydrogeology, 328 pp. CRC Press, Boca Raton.
- Craig H. 1961.** Isotopic variations in meteoric waters. *Science* 133(3465): 1702-1703.
- Dussailant I, E Berthier, F Brun, M Masiokas, R Hugonnet, V Favier, A Rabatel, P Pitte & L Ruiz. 2019.** Two decades of glacier mass loss along the Andes. *Nature Geoscience* 12: 802-808.
- Fernandoy F, D Tetzner, H Meyer, G Gacitúa, K Hoffmann, U Falk, F Lambert & S MacDonell. 2018.** New insights into the use of stable water isotopes at the northern Antarctic Peninsula as a tool for regional climate studies. *The Cryosphere* 12: 1069-1090.
- Hoefs J. 2009.** Stable isotope geochemistry, 286 pp. Springer, Berlin.
- Meredith MP, KE Grose, EL McDonagh, KJ Heywood, RD Frew & PF Dennis. 1999.** Distribution of oxygen isotopes in the water masses of Drake Passage and the South Atlantic. *Journal of Geophysical Research* 104: 20949-20962.
- Muñoz P, J Sellanes, K Villalobos, G Zapata-Hernández, C Mayr & K Araya. 2014.** Geochemistry of reduced fluids from shallow cold vents hosting chemosynthetic communities (Comau Fjord, Chilean Patagonia, 42°S). *Progress in Oceanography* 129: 159-169.
- Negri A, L Daniele, D Aravena, M Muñoz, A Delgado & D Morata. 2018.** Decoding fjord water contribution and geochemical processes in the Aysen thermal springs (Southern Patagonia, Chile). *Journal of Geochemical Exploration* 185: 1-13.
- Rebolledo L, J Sepúlveda, CB Lange, S Pantoja, S Bertrand, K Hughen & D Figueroa. 2008.** Late Holocene marine productivity changes in Northern Patagonia-Chile inferred from a multiproxy analysis of Jacaf channel sediments. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 80: 314-322.
- Rebolledo L, S Bertrand, CB Lange, FJ Tapia, E Quiroga, M Troch, N Silva, P Cárdenas & S Pantoja. 2019.** Compositional and biogeochemical variations of sediments across the terrestrial-marine continuum of the Baker-Martínez fjord system (Chile, 48° S). *Progress in Oceanography* 174: 89-104.
- Rodrigo C, S Giglio & A Varas. 2016.** Glacier sediment plumes in small bays on the Danco Coast, Antarctic Peninsula. *Antarctic Science* 28: 395-404.
- Rodrigo C, A Varas-Gómez, C Grisales, D Quintana-Saavedra & R Molares. 2021.** Glacimarine sediment flows in small bays on the Danco Coast, Antarctic Peninsula. *Bulletin of Marine and Coastal Research* 50: 149-168.
- Sauter T. 2020.** Revisiting extreme precipitation amounts over southern South America and implications for the Patagonian Icefields. *Hydrology and Earth System Sciences* 24: 2003-2016.
- Schwikowski M, M Schläppi, P Santibañez, A Rivera & G Casassa. 2013.** Net accumulation rates derived from ice core stable isotope records of Pío XI glacier, Southern Patagonia Icefield. *The Cryosphere* 7: 1635-1644.
- Sievers HA, C Calvete & N Silva. 2002.** Distribución de características físicas, masas de agua y circulación general para algunos canales australes entre el golfo de Penas y el estrecho de Magallanes (Crucero CIMAR Fiordo 2), Chile. *Ciencia y Tecnología del Mar* 25: 17-43.
- Vargas CA, RA Martínez, V San Martín, M Aguayo, N Silva & R Torres. 2011.** Allochthonous subsidies of organic matter across a lake-river-fjord landscape in the Chilean Patagonia: Implications for marine zooplankton in inner fjord areas. *Continental Shelf Research* 31: 187-201.
- Whitney NM, AD Wanamaker, M Switzer & NR Pettigrew. 2020.** Using stable isotopes as tracers of water masses and nutrient cycling processes in The Gulf of Maine. *Continental Shelf Research* 206: 104210. <doi: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2020.104210>>

Recibido el 27 de mayo de 2021 y aceptado el 10 de agosto de 2021