

BALANCES DE MASA GEODÉSICO DE 5 GLACIARES CHILENOS ENTRE 30° Y 40° LATITUD SUR

Alejandra Espinoza Ríos¹, Alexis Segovia Rocha¹, Jorge Huenante Gutierrez¹, Gino Casassa Rogazinski¹, Daniela Carrión Olivares¹.

¹Dirección General de Aguas (DGA), División de Hidrología, Ministerio de Obras Públicas (MOP), Chile

INTRODUCCIÓN

En el marco de los monitoreos de balances de masa según macrozonas glaciológicas, por encargo de la Dirección General de Aguas (DGA), se realizaron cuatro estudios a cargo de centros de investigación y universidades con el objetivo de monitorear y conocer los balances de masa geodésicos durante el periodo hidrológico 2021-2022. Específicamente en los glaciares Tapado, Macrozona Norte, a cargo del Centro de Estudios en Zonas Áridas (CEAZA); glaciar Juncal Norte, Macrozona Centro, a cargo de la Universidad Andrés Bello (UNAB de Viña del Mar); Nevados de Chillán, Macrozona Sur, a cargo de la Universidad de Concepción (UdeC) y glaciar suroriental del volcán Mocho, Macrozona Sur, por la Universidad Austral de Chile (UACH). Adicionalmente, personal de la DGA efectuó el balance de masa geodésico del glaciar San Francisco, Macrozona Centro.

En el presente trabajo se mostrarán los resultados de los balances de masa mencionados, además de un análisis de su variación latitudinal. A modo de poder visualizar las variaciones del último tiempo en los 5 glaciares estudiados, se realizó un *timelapse* de la variación areal para cada glaciar abarcando un periodo de 7 años, 2016 al 2023.

MÉTODO

La metodología utilizada para el cálculo de los 5 balances de masa consideró, en todos los casos, el cómputo de las diferencias de Modelos de Elevación Digital (DEM en inglés) derivados de levantamientos LiDAR terrestres realizados por la DGA al final de los periodos estivales de 2021 y 2022.

El LiDAR terrestre corresponde al modelo VZ-6000 de RIEGL cuyas especificaciones técnicas son óptimas para captar señales reflectivas de zonas glaciares, con posibilidad de medir distancias máximas de hasta 6 kilómetros y excepcionalmente aún más (RIEGL, 2015). La longitud de onda en la que trabaja es de 905 nm, la cual resulta ideal para no ser absorbida por la superficie del hielo o la nieve (Prokop, 2008).

Para las variaciones areales de los glaciares se utilizó el programa <https://www.planet.com/stories/creáte>. Se seleccionaron imágenes PlanetScope (resolución 3 m) de fines de temporada estival y con mínima cobertura nival disponibles desde el año 2016 a 2023.

(Fischer et al., 2016):

$$B_{geo} = \frac{\Delta V_{DEM}}{A} \quad [m \text{ eq. a.}]$$

Dónde:

- B_{geo} = Balance de masa geodésico = b_n = balance de masa neto
- ΔV = Variación altimétrica del glaciar
- f_{AIR} = Densidad de agua 1000 (kg/m³)
- f_{HI} = Densidad de hielo definida en 900 kg/m³ (Cuffey & Paterson 2010)
- A = Área del glaciar

Para calcular ΔV , que se define como el cambio que se obtiene entre la diferencia de la elevación en función al tiempo, se establece con la siguiente fórmula:

$$\Delta V = r^2 \sum_{k=1}^k \Delta h_k \quad [m^3]$$

Dónde:

- k = Número de píxeles que abarca el área glaciar
- Δh_k = Diferencia de elevación entre dos píxeles k y r

RESULTADOS



FIGURA 1. Levantamiento geodésico con instrumento LiDAR terrestre.

Tabla 5. El cambio de elevación promedio (prom.), la desviación estándar (stdev), e.a. (equivalente de agua), cambio de volumen, y cambio de volumen en e.a. para cada raster derivado de LiDAR (invernal, verano) para el glaciar desnubado y dos glaciares cubiertos del complejo Tapado (Figura 3-5).

Período	Prom. (m)	Stdev. (m)	Prom. (m e.a.)	Volumen (km ³)	Volumen (km ³ e.a.)
Glaciar desnubado					
Invernal	3,72	0,93	0,89	0,0015	0,0008
Verano	-1,91	1,06	-1,62	-0,0017	-0,0014
Anual			-0,73		-0,0007
Glaciares cubiertos					
Invernal	0,17	0,43	0,14	0,0002	0,0001
Verano	-0,49	0,95	-0,41	-0,0004	-0,0003
Anual			-0,28		-0,0002

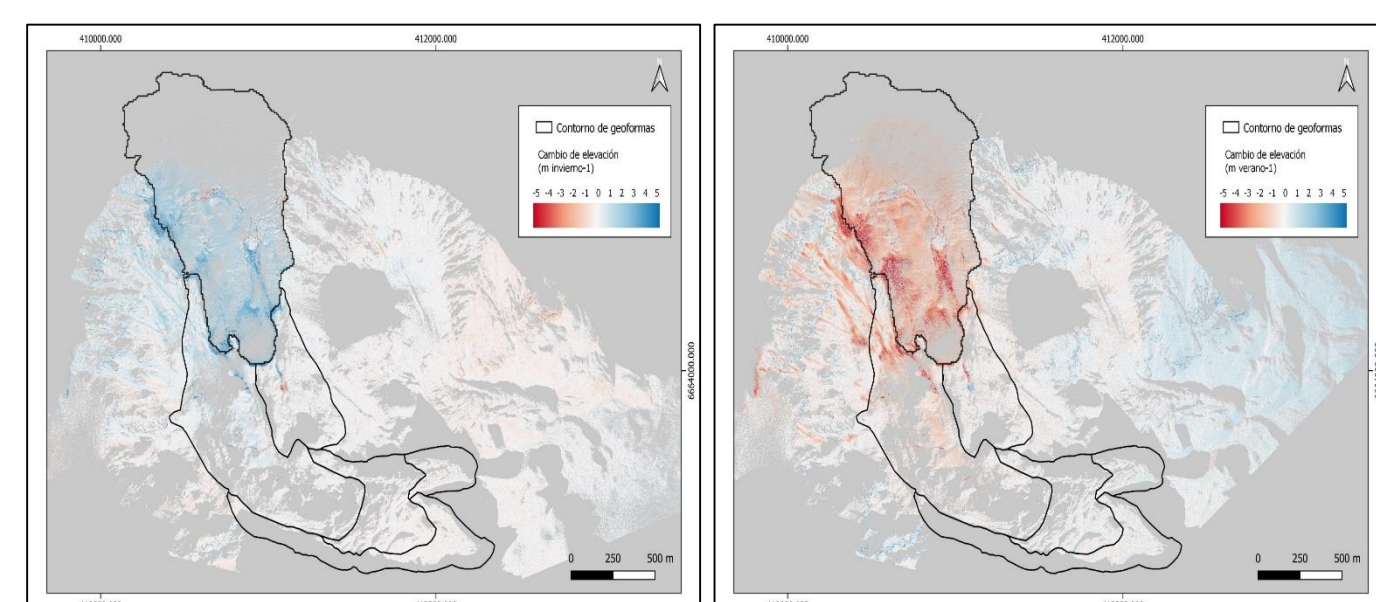


FIGURA 2. Cambio de elevación invernal (engrosamiento) y estival (adelgazamiento) en el glaciar Tapado durante 2021-2022.

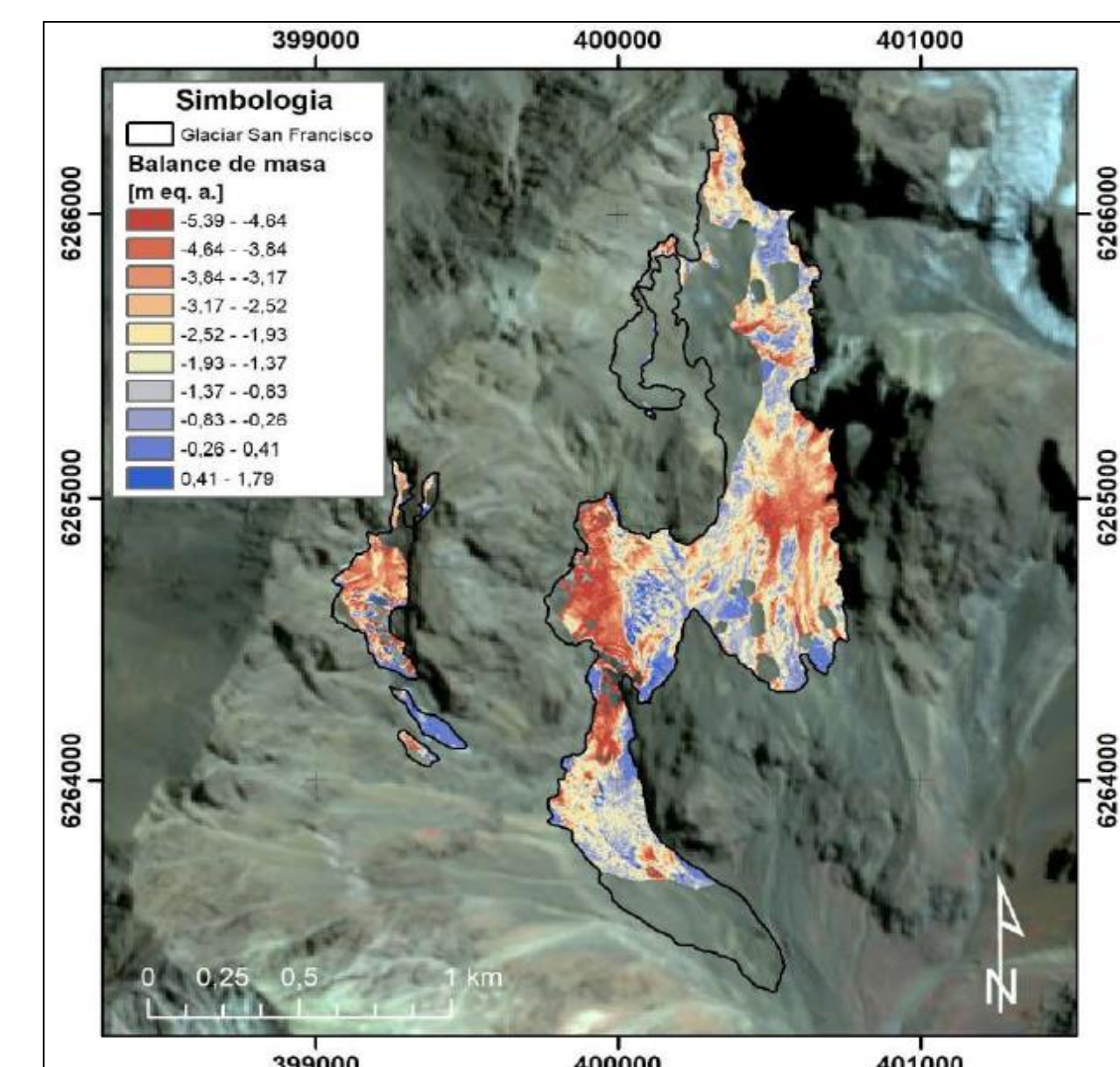


FIGURA 5. Balance de masa geodésico para el glaciar San Francisco entre los levantamientos LiDAR del 14 abril 2021 y 14 abril 2022. Imagen de fondo Sentinel-28 del 17 febrero 2022.

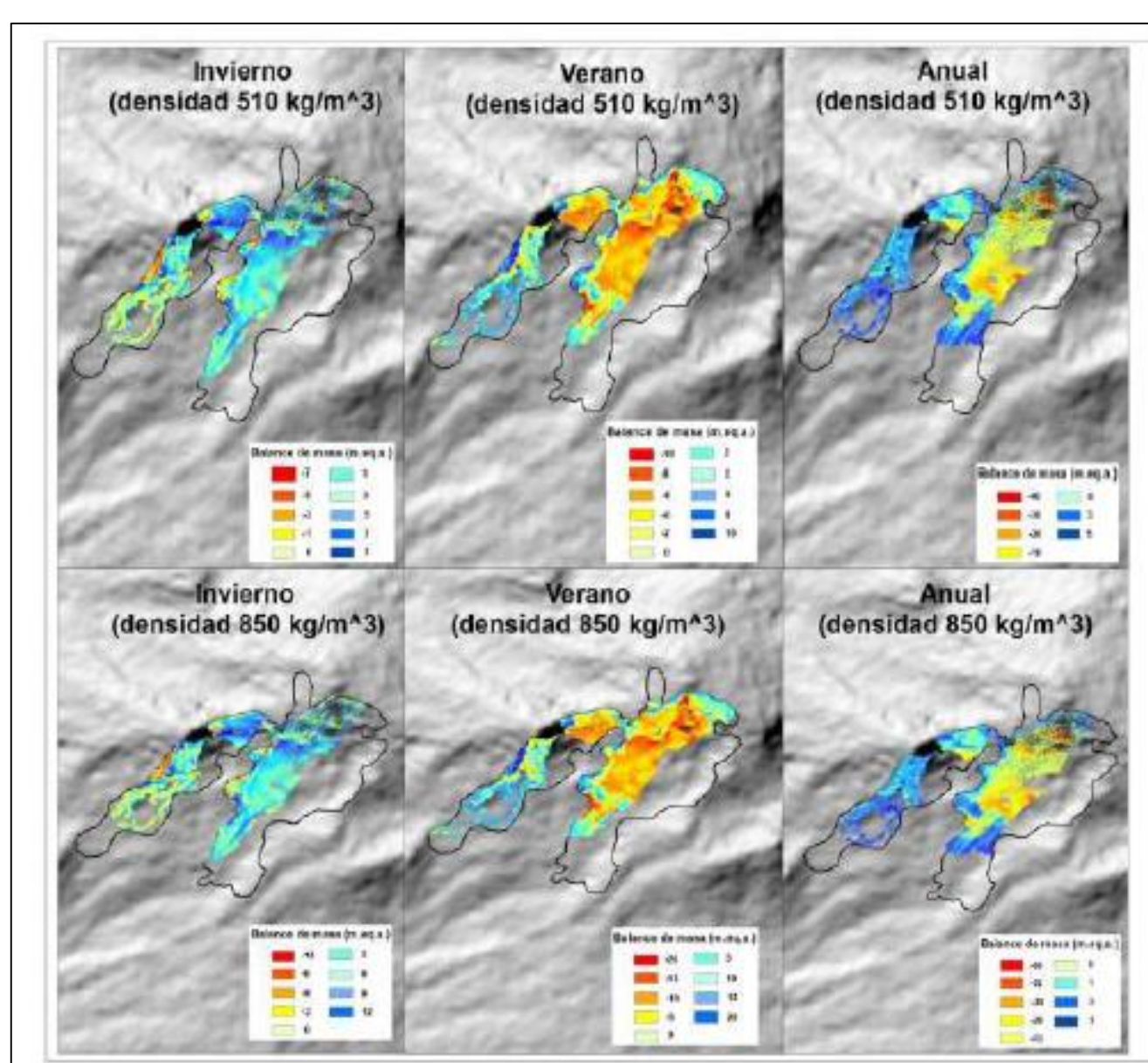


FIGURA 6. Balance de masa geodésico para el glaciar Nevados de Chillán 2021-2022.

Tabla 3. Balance de masa geodésico del glaciar Juncal Norte entre marzo de 2021 y marzo de 2022.

Fecha DEM	Más de este estado	Área (km ²)	Variación volumétrica (m ³)	Balance de masa equivalente en agua (m e.a.)	Balance de masa equivalente en agua (m e.a.)
Marzo 2021 - Octubre 2021	7	1,76	3,261.188.481	0,34	0,10
Octubre 2021 - Marzo 2022	5	1,77	-6.033.955.502	-2,41	-0,68
Marzo 2021 - Marzo 2022	12	1,76	-1.800.415.43	-1,47	-0,38

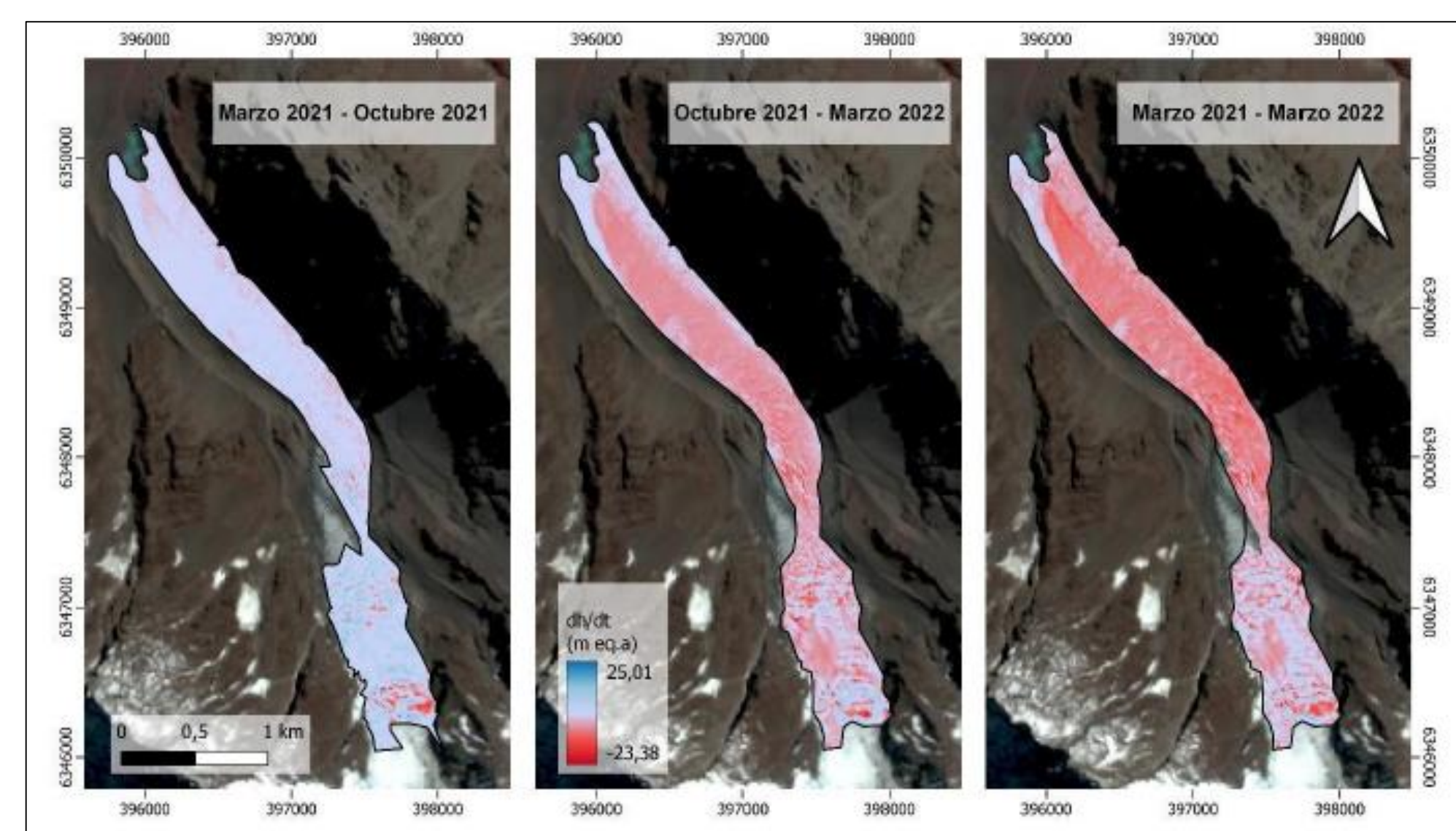


FIGURA 3. Balance de masa geodésico marzo 2021-marzo 2022 para el glaciar Juncal Norte. Imagen de fondo Landsat 8 OLI/TIRS de marzo 2021.

Tabla 31. Resumen de cambios de volumen y balance de masa geodésico para cada periodo.

Periodo	Cambio de volumen (km ³)	Cambio de elevación total (m)	Cambio de elevación (m e.a.)
Inverno 2021	0,01	4,1940,11	2,4480,09
Verano 2021/22	-0,03	-8,3280,44	-5,9750,37
Anual 2022-2021	-0,02	-4,1340,33	-3,5270,28

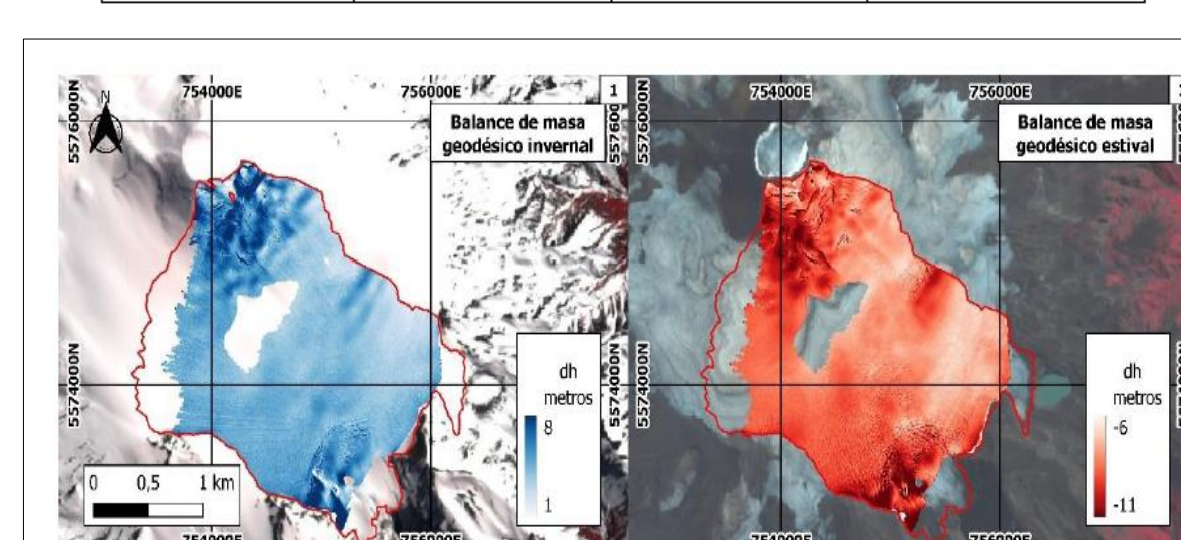


FIGURA 7. Cambios de elevación 2021-2022 para el glaciar Mocho. Izquierda, invernal, y derecha estival.

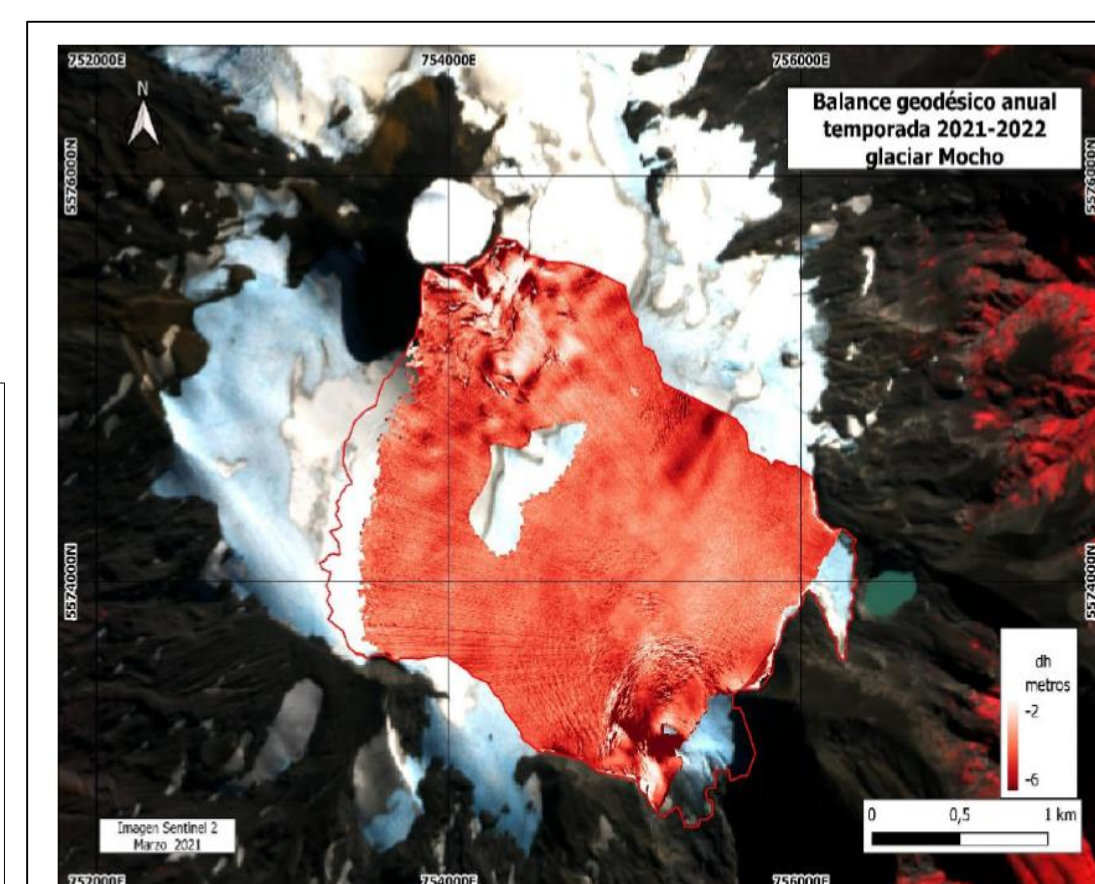
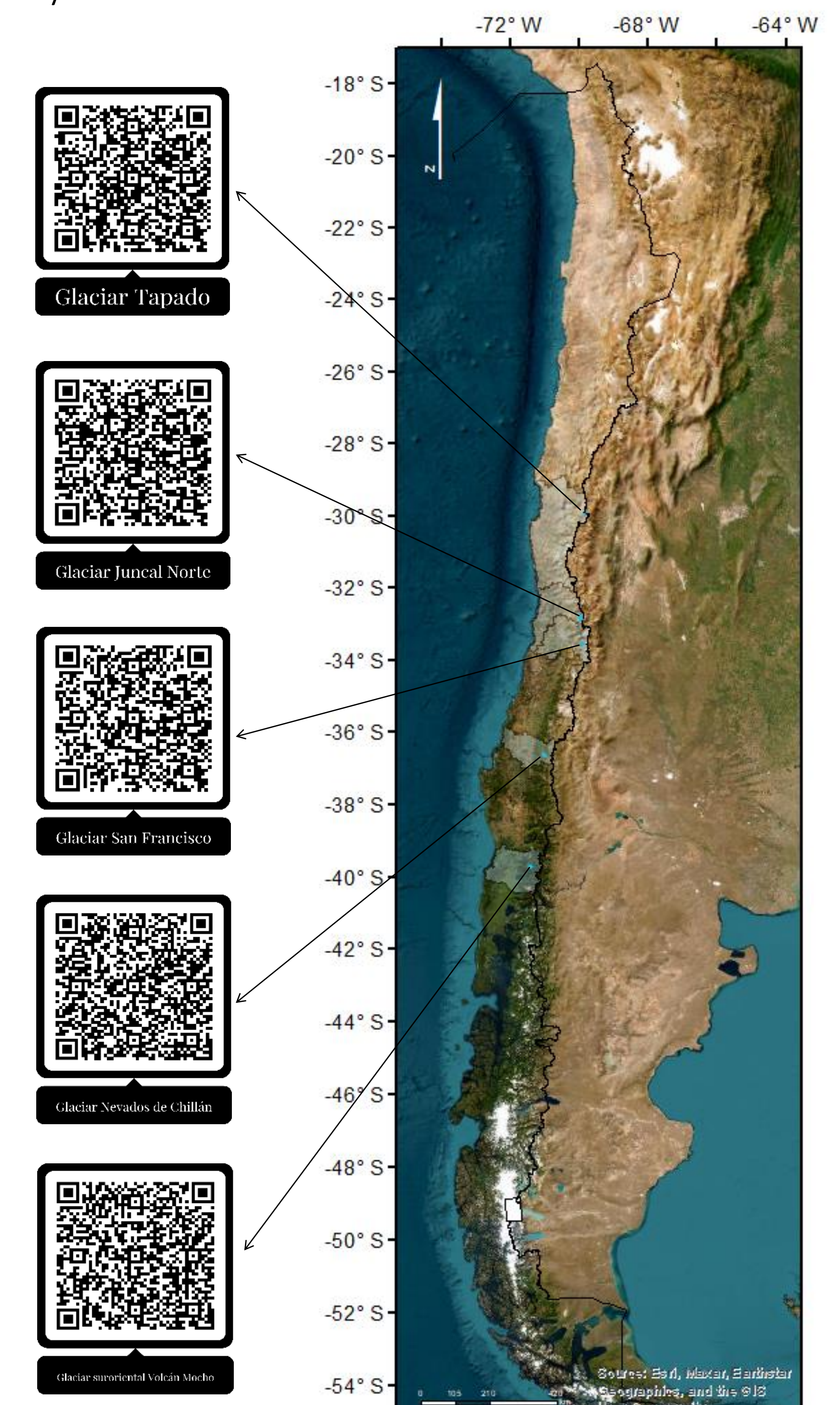


FIGURA 7. Balance de masa geodésico anual 2021-2022 para el glaciar Mocho. Imagen de fondo Sentinel-2 del 25 de marzo 2021.

FIGURA 4. 7 Años de variaciones areales de los 5 glaciares entre 30° y 40° Latitud Sur.



Los resultados aquí presentados indican que el glaciar CL108116004 está siendo sometido a una tendencia de balance de masa negativo que es consecuencia de un aumento de las condiciones de ablación durante el verano, que eliminan casi completamente las ganancias de nieve invernal. Esta tendencia se debe en parte a la baja altitud del complejo Nevados de Chillán, que genera condiciones de extrema sensibilidad a la elevación de la isoterma de cero grados, que probablemente en verano supera la cumbre. Una extrapolación de la temperatura media de la estación DGA Las Trancas (~1250 m s.n.m) empleando varios gradientes lineales que se reportan en la literatura (Fernández & Mark, 2016), desde -5,5 °K/km a -7,5 °K/km, indican que entre un 27% a 67% del periodo octubre 2021 a abril 2022, la isoterma se localizó sobre la cumbre (Figura 8). Si se considera solo el período entre octubre 2021 y enero 2022, esa proporción llega hasta 78%.

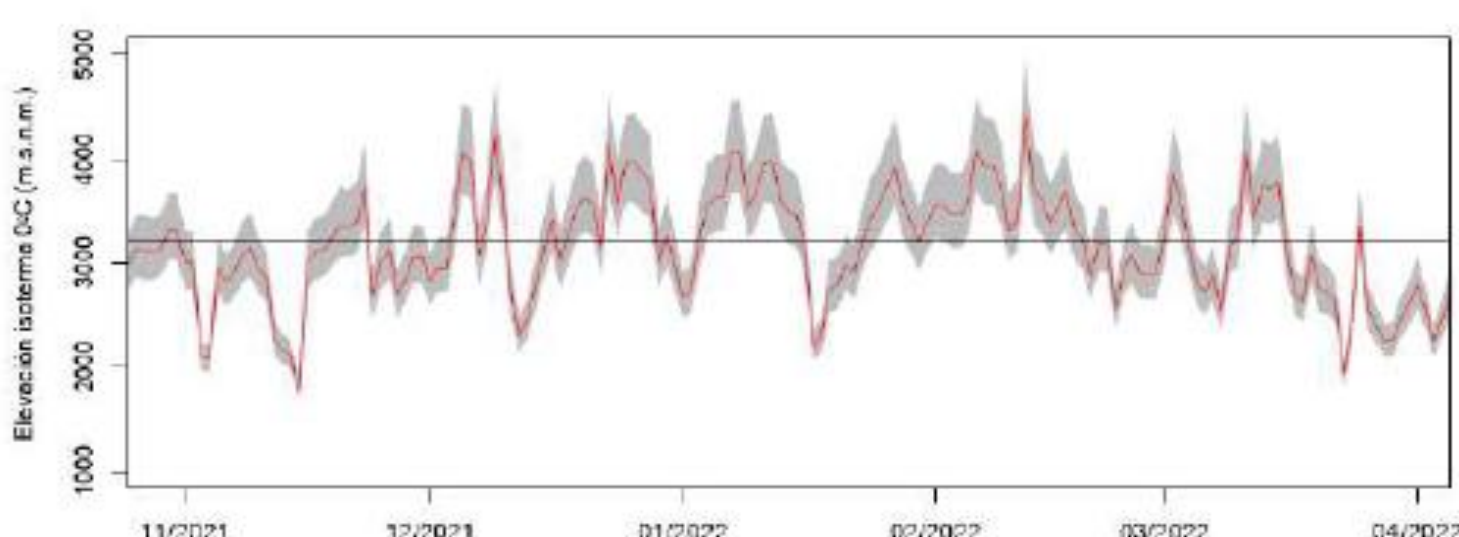


FIGURA 8. Elevación de la isoterma de cero grados, extrapolada aplicando gradientes de temperatura a los datos disponibles en la estación Las Trancas. La línea roja representa la extrapolación empleando un valor de -6,5 °K/km, mientras que el polígono gris el rango posible considerando -5,5 °K/km y -7,5 °K/km. La línea horizontal negra indica la altitud de la cumbre de Nevados de Chillán.

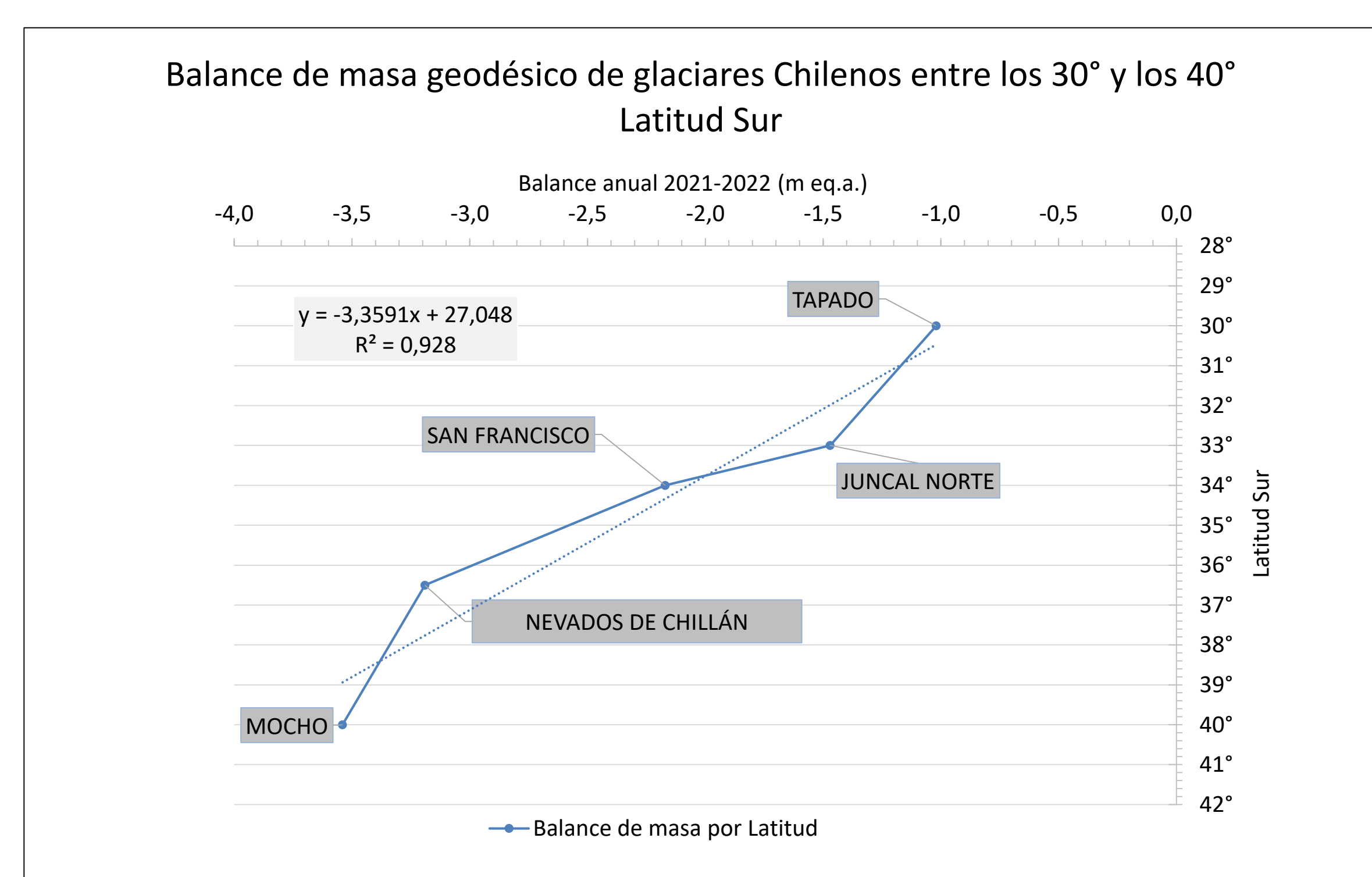


FIGURA 9. Gradiante latitudinal del balance de masa geodésico de los 5 glaciares para el año hidrológico 2021-2022. Se observa una disminución aproximadamente lineal del balance de masa hacia el sur.

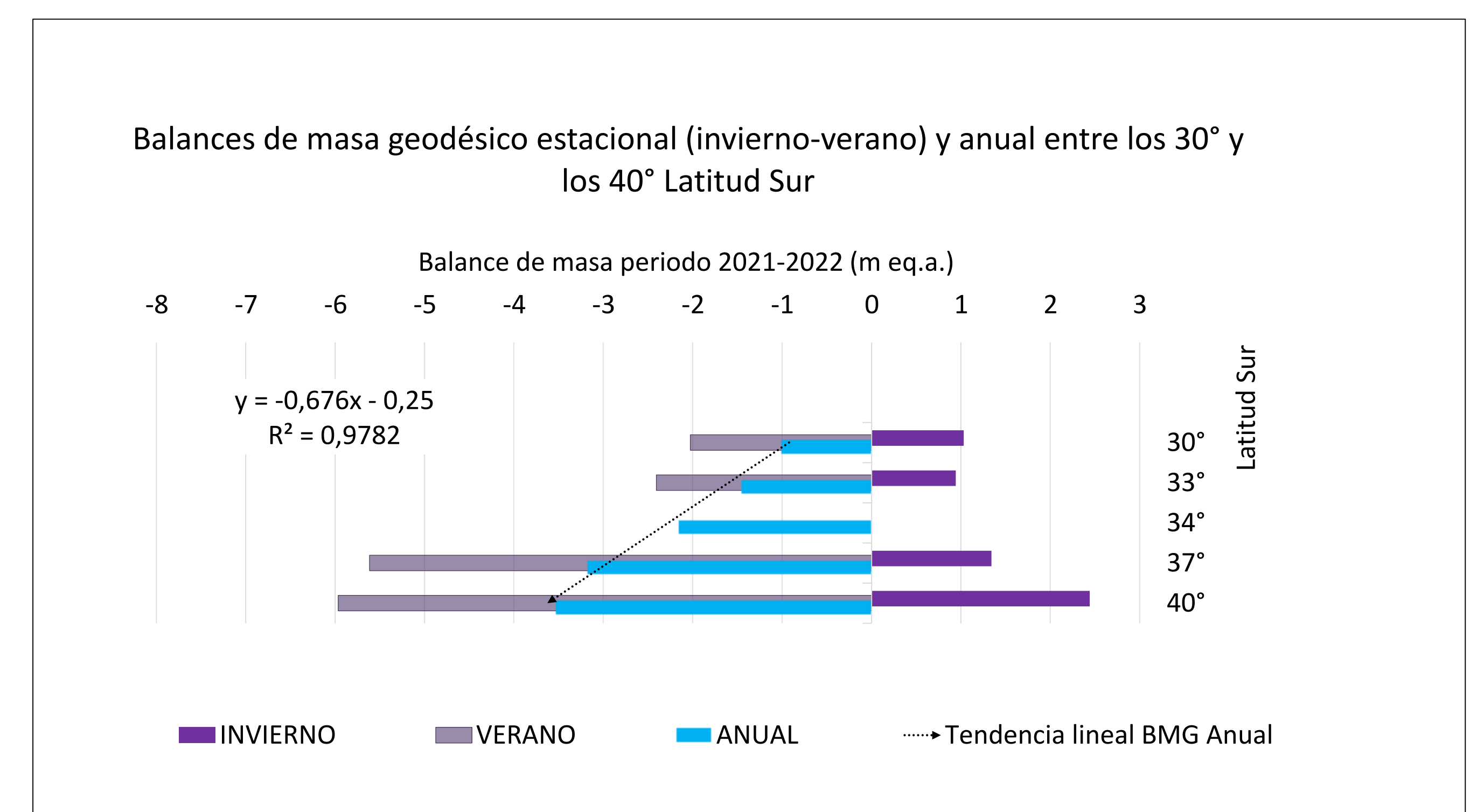


FIGURA 10. Balances de masa geodésico estacional (invierno-verano) y anual entre los 30° y 40° Latitud Sur. Se observa una disminución aproximadamente lineal del balance de masa hacia el sur.

CONCLUSIONES

Se concluye que a lo largo de todo el rango latitudinal estudiado (30° a 40° latitud sur) los balances de masa de los 5 glaciares estudiados son negativos, vale decir, han perdido masa en el año hidrológico 2021-2022.

Existe una alta relación entre el balance de masa y la latitud, con un aumento aproximadamente lineal de la pérdida de masa hacia el sur.

En la Figura 10 se observa que en todos los glaciares los balances de masa del periodo estival son negativos, superando mas del doble numéricamente lo acumulado en invierno. Esto quiere decir, que los glaciares no solo perdieron toda la nieve acumulada en invierno, sino que también perdieron hielo de temporadas pasadas. **La pérdida de masa está directamente relacionada con el aumento considerable de las temperaturas durante la temporada invernal, y así mismo con la disminución de las precipitaciones invernales, particularmente luego de 12 años de la megasequía iniciada en 2010. En el caso del glaciar Nevados de Chillán (Fig. 6), la isoterma cero durante la época estival 2021-2022 se situó frecuentemente por sobre la cota superior del glaciar (Fig. 8). Considerando las predicciones futuras de cambio climático, esto propone un escenario negativo para los futuros balances de masa de los glaciares cordilleranos chilenos.**

REFERENCIAS

- Fischer, M., Huss, M., Kummerow, M., & Hoelzle, M. 2016. Application and validation of long-range terrestrial laser scanning to monitor the mass balance of very small glacier in the Swiss Alps. *The Cryosphere*, 10, 1279-1295.
- Dirección General de Aguas (DGA), 2022. Apoyo para el Monitoreo de Detalle Intensivo del Glaciar Tapado, Región de Coquimbo, Macrozona Norte, 2021-2022. Realizado por el Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas.
- Dirección General de Aguas (DGA), 2022. Apoyo para el Monitoreo de Detalle Intensivo del Glaciar Juncal Norte, Región de Valparaíso, Macrozona Centro, 2021-2022. Realizado por el Laboratorio de Análisis Isotópico de la Universidad Andrés Bello.
- Dirección General de Aguas (DGA), 2022. Apoyo para el Monitoreo de Detalle Intensivo del Glaciar Principal Del Complejo Volcánico Nevados de Chillán, Región De Ñuble, Macrozona Sur, 2021-2022. Realizado por el Departamento de Geografía Universidad de Concepción.
- Dirección General de Aguas (DGA), 2022. Apoyo para el Monitoreo de Detalle Intensivo del Glaciar Sur-oriental del Volcán Mocho, Región De Los Ríos, Macrozona Sur, 2021-2022. Realizado por Universidad Austral de Chile.