

PRIMERA APROXIMACIÓN PARA MODELAR LA LÍNEA DE EQUILIBRIO EN GLACIARES DEL CAMPO DE HIELO PATAGÓNICO SUR A PARTIR DE VARIABLES CLIMÁTICAS

Ignacio Ortiz Diaz¹, Diego Araneo¹, Gabriela Lenzano¹,
irortiz@mendoza-conicet.gob.ar. Autor/a correspondiente.

¹Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA) – CCT Mendoza, Argentina

Palabras clave: Isoterma 0°C, precipitación, regresiones.

1) INTRODUCCIÓN

Los glaciares son indicadores climáticos de gran importancia. La línea de equilibrio altitudinal (ELA, por sus siglas en inglés), separa la zona de acumulación (balance positivo) de la zona de ablación (balance negativo). Los glaciares son particularmente sensibles a cualquier cambio que se experimente en el clima, ya sea de escala regional o global (Ohmura & Boettcher, 2022). El Campo de Hielo Patagónico Sur (CHPS) es la masa de hielo continental más grande del hemisferio sur, a excepción de la Antártida, con una superficie total de aproximadamente 12,200 km² (Meier et al., 2018).

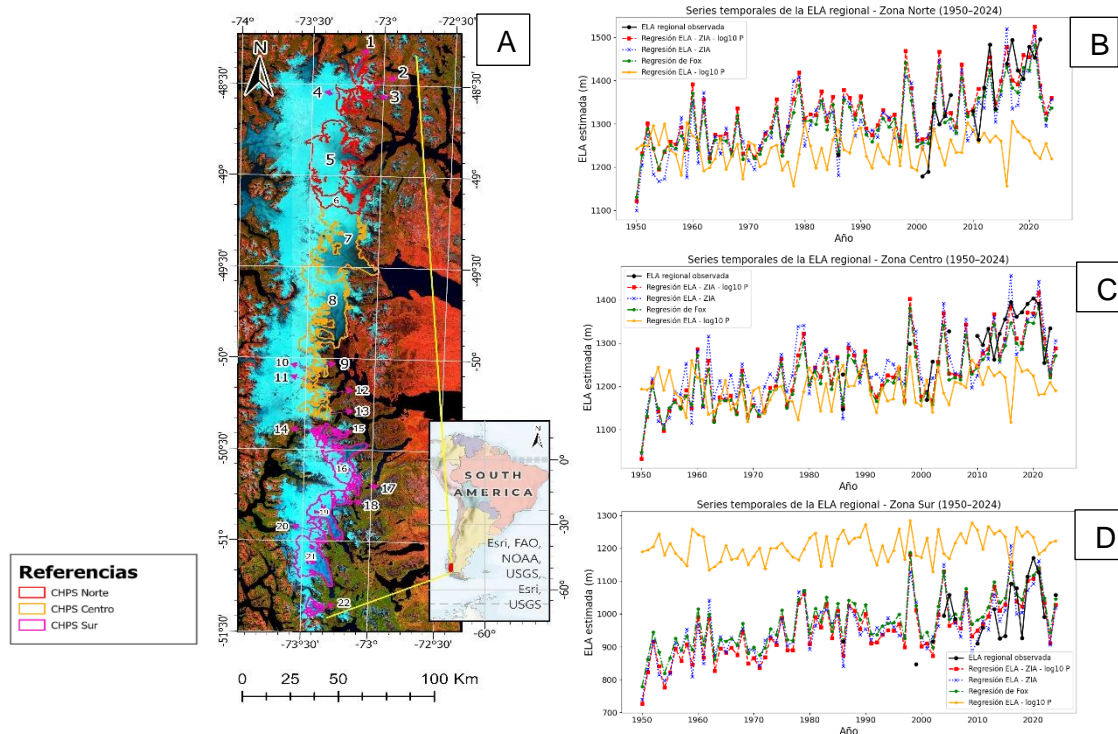


Figura 1. A) Ubicación de la zona de estudio, margen oriental del CHPS. ELA's modeladas y ELA's observadas para las zonas norte (B), centro (C) y sur (D). Fuente: Elaboración propia.

El objetivo de este estudio es el de encontrar y evaluar relaciones empíricas entre la ELA regional de tres zonas de la margen oriental del CHPS con la altura promedio anual de la isoterma de 0°C y la precipitación acumulada anual, con el fin de modelar el primero en años donde no se disponía de datos *in situ* ni derivados de productos satelitales.

2) METODOLOGÍA

Los datos utilizados para obtener una ELA anual modelada desde mediados del siglo XX fueron: 1). Altura de la Línea de Nieve regional (SLA, por sus siglas en inglés) a partir del promedio de la SLA de

23 glaciares de la margen oriental del CHPS, que equivale a la ELA en la parte final de la temporada de ablación (Meier, 1962), para el período 1986-2023/2024. Los datos son propios de los autores y fuentes bibliográficas (Aniya et al., 1997; Casassa et al., 2014). La zonificación se hizo en base a lo propuesto por Bravo et al., (2021); 2). Altura promedio anual de la isoterma 0°C (ZIA, por sus siglas en inglés), obtenida de la base de datos de reanálisis global de quinta generación del clima ERA5, Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo (ECMWF) para el período 1950-2024 (Hersbach et al., 2023); 3). Precipitación acumulada anual (P): Extraídos de la base de datos ERA5 Land, el cual es un subconjunto de datos del ERA5 detallado previamente, para el período 1950 al 2024 (Muñoz Sabater, 2019). Se establecieron cuatro relaciones empíricas entre las diferentes variables. La ecuación (1) es la relación determinada por Fox & Bloom, (1994). Las ecuaciones (2) y (3) son regresiones lineales simples entre la ELA regional y ZIA, y ELA y el logaritmo de P respectivamente. Por último, la ecuación (4) es una regresión lineal múltiple que combina las tres variables en su totalidad:

$$ELA = c_1 - c_2 * \log_{10} P + ZIA \quad (1)$$

$$ELA = c_{1.1} + c_{2.1} * ZIA \quad (2)$$

$$ELA = c_{1.2} + c_{2.2} * \log_{10} P \quad (3)$$

$$ELA = c_{1.3} * ZIA + c_{2.3} * \log_{10} P + c_{3.2} \quad (4)$$

Dónde c_i son las distintas constantes obtenidas a partir de las regresiones lineales propuestas entre las diferentes variables.

Para evaluar qué proporción de la variabilidad en la ELA observada es explicada por cada modelo, se usó el parámetro R^2 , así como el parámetro Prob(F-Statistic) para determinar el nivel de significancia estadística de las regresiones. Así mismo, se determinó el grado de error de la ELA modelada para cada región, con respecto a la ELA observada, mediante el error cuadrático medio (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (5)$$

Dónde \hat{y}_i e y_i son los valores modelados y observados de la ELA respectivamente, y n el número de observaciones.

3) RESULTADOS

Regresión	R2	p (prob F-statistic)	RMSE
ELA - ZIA - log10 P	0.859	1.03E-23	68.71
ELA - ZIA	0.831	7.19E-23	75.02
Regresión de Fox	0.171	0.00137	71.1
ELA - log10 P	0.056	0.0756	177.02

Tabla 1. Parámetros estadísticos obtenidos de las regresiones realizadas.

Cómo se observa en la tabla 1, el modelo que mejor se ajustó a la ELA observada fue el de la regresión lineal múltiple, seguido de la regresión lineal entre la ELA y ZIA. Sin embargo, al calcular el RMSE entre la ELA observada y la ELA modelada por las distintas regresiones, es notorio que a excepción de la regresión ELA-log₁₀

P, los demás modelos muestran errores similares. Esto indicaría que en la margen oriental del CHPS, la temperatura, representada por la altura de la isoterma 0°C, estaría jugando un papel importante en la variabilidad de la ELA. Si analizamos por regiones la figura 3 muestra que la región que mejor ajuste tiene es la norte, seguida por la región sur y finalmente por la región central. En todos los casos, indicado en las figuras 1A, 1B y 1C, si bien existe una alta variabilidad temporal, se evidencia un aumento en la ELA en la margen oriental del CHPS, principalmente a partir del inicio del siglo XXI, en consonancia con el retroceso de los glaciares en la región.

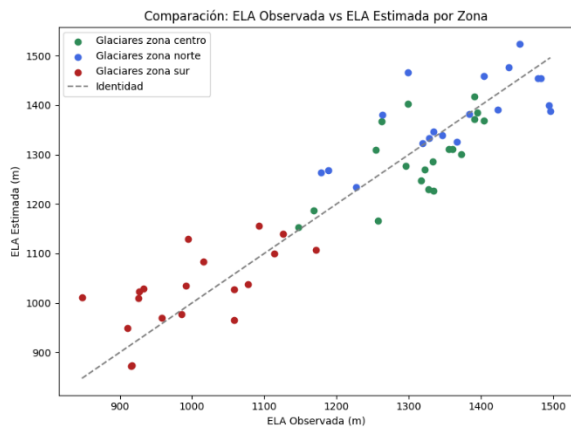


Figura 2. Comparación entre los valores de ELA modelado con la regresión múltiple, respecto a los valores de ELA observados que se usaron para forzar las distintas regresiones.

3) CONCLUSIONES

Se evidencia una relación directa, y estadísticamente significativa entre la altura de isoterma 0 y la altura de la línea de equilibrio; así como un aumento en la ELA desde mediados del siglo XX. Sin embargo, es importante notar que habría que analizar la posibilidad de realizar modelos individuales por zona para solidificar esta hipotética correlación ELA – isoterma, además de considerar otros parámetros, climáticos y propios de los glaciares que estarían condicionando la variabilidad de la ELA en la región.

REFERENCIAS

Aniya, M., Sato, H., Naruse, R., Skvarca, P., & Casassa, G., 1997: Recent Glacier Variations in the Southern Patagonia Icefield, South America. *Arctic and Alpine Research*, 29(1), 1-12.

Bravo, C., Bozkurt, D., Ross, A. N., & Quincey, D. J., 2021: Projected increases in surface melt and ice loss for the Northern and Southern Patagonian Icefields. *Scientific Reports*, 11(1), 16847.

Casassa, G., Rodríguez, J. L., & Loriaux, T., 2014: A New Glacier Inventory for the Southern Patagonia Icefield and Areal Changes 1986–2000. En J. S. Kargel, G. J. Leonard, M. P. Bishop, A. Kääh, & B. H. Raup (Eds.), *Global Land Ice Measurements from Space* (pp. 639-660). Springer Berlin Heidelberg

Fox, A. N., & Bloom, A. L., (1994): Snowline altitude and climate in the Peruvian Andes (5°-17° S) at present and during the Latest Pleistocene Glacial Maximum. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, 103(7), 867-885.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., and others, 2023: ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), (Accedido el 21-Marzo-2025).

Meier, M. F. (1962): Proposed definitions for glacier mass budget terms. *Journal of Glaciology*, 4(33), 252-263.

Meier, W. J.-H., Griesinger, J., Hochreuther, P., & Braun, M. H., 2018: An updated multi-temporal glacier inventory for the Patagonian Andes with changes between the Little Ice Age and 2016. *Frontiers in Earth Science*, 6, 62.

Muñoz Sabater, J., 2019: ERA5-Land hourly data from 1950 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (Accedido el 21-Marzo-2025).

Ohmura, A., & Boettcher, M., 2022: On the shift of glacier equilibrium line altitude (ELA) under the changing climate. *Water*, 14(18), 2821.