

Universidad Nacional de Cuyo – Facultad de Ciencias Agrarias

**Ingeniería en Recursos Naturales Renovables**

Mendoza, Argentina



TESIS DE GRADO

**CAMBIOS RECIENTES DEL GLACIAR ALERCE (1953-  
2020) Y SU PONDERACIÓN COMO GLACIAR DE  
REFERENCIA PARA LOS ANDES DEL NORTE DE  
PATAGONIA.**

**Tesista:** GHILARDI TRUFFA, Juan Cruz

**Director:** RUIZ, Lucas Ernesto

**Codirector:** PITTE, Pierre

2021



**UNCUYO**  
UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE CUYO



FACULTAD DE  
**CIENCIAS  
AGRARIAS**

**Título:**

CAMBIOS RECIENTES DEL GLACIAR ALERCE (1953-2020) Y SU PONDERACIÓN  
COMO GLACIAR DE REFERENCIA PARA LOS ANDES DEL NORTE DE PATAGONIA.

**Tesista:**

GHILARDI TRUFFA, Juan Cruz

[jghilardi@est.fca.uncu.edu.ar](mailto:jghilardi@est.fca.uncu.edu.ar)

**Director:**

RUIZ, Lucas Ernesto

[lruiz@mendoza-conicet.gob.ar](mailto:lruiz@mendoza-conicet.gob.ar)

**Codirector:**

PITTE, Pierre

[pierrepitte@mendoza-conicet.gob.ar](mailto:pierrepitte@mendoza-conicet.gob.ar)

**Comisión Evaluadora:**

D'AMARIO FERNÁNDEZ, María Julieta

[julietadamario@gmail.com](mailto:julietadamario@gmail.com)

CISTERNAS GUZMÁN, Sebastián Esteban

[scisternas@cecs.cl](mailto:scisternas@cecs.cl)

LO VECCHIO REPETTO, Andrés

[anlovecchio@mendoza-conicet.gob.ar](mailto:anlovecchio@mendoza-conicet.gob.ar)



## RESUMEN

En las últimas décadas se ha observado un retroceso de los glaciares en todos los cordones montañosos del mundo. Durante los últimos 20 años, los glaciares de los Andes perdieron masa a una de las tasas más altas registradas. La pérdida es más acentuada en los Andes tropicales y Andes Patagónicos. En particular, los glaciares de Patagonia Norte son los que presentan la mayor tasa de pérdida de todas las regiones Andinas para la última década. Para identificar tendencias de cambio y modelar cómo pueden verse afectados los glaciares frente a posibles escenarios de cambio climático, es crucial contar con series de datos que abarquen escalas temporales más amplias. Por lo cual, en el presente estudio se realizó una reconstrucción de la extensión (área y largo) del glaciar Alerce (41°09'S – 71°49'O) para los últimos 70 años, con el objetivo de evaluar su ponderación como glaciar de referencia para los Andes de Patagonia Norte.

Se replicaron fotografías históricas del frente y se digitalizó un mapa levantado por S. Rubulis, J.C. Leiva y J. Suarez, profesionales del Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA), para el período 1953-1983, con el fin de poner en valor la documentación histórica del Alerce. A partir de la interpretación de esta información, y el uso de sistemas de información geográfica (QGIS 3.18.2), se generó la cartografía de detalle con las fluctuaciones del glaciar para el período 1953-2020. Para cuantificar los cambios de posición del frente se evaluaron cuatro metodologías: i) línea de flujo central; ii) caja curvilínea; iii) multilínea; iv) caja variable. Por último, se analizaron y compararon los cambios observados con las series de los glaciares Esperanza Norte y Frías.

Los cambios en el área y la posición del frente evidencian un marcado retroceso durante los últimos 70 años. El glaciar perdió un 35% de su superficie y alcanzó un retroceso acumulado de  $1.49 \pm 0.04$  km. Sin embargo, los resultados de las variaciones del frente varían considerablemente de acuerdo a la metodología aplicada. El método más adecuado para el caso del Alerce resulta ser el de caja variable, dado que contempla la variación en el ancho del frente para el período estudiado. Es posible distinguir diferentes patrones de cambio a lo largo del tiempo. En primera instancia se observa una etapa de retroceso (hasta fines de los 60), seguido de un período de avance o relativa estabilidad (en los 70), luego un fuerte retroceso (década del 80-90) y finalmente, un período de retracción relativamente baja (00-10 en adelante). Si se comparan estos cambios con las series mejor documentadas de la región se observa un patrón de comportamiento similar, inclusive a escala decadal. Por lo cual, su ponderación como glaciar de referencia para los Andes de Patagonia Norte parece ser acertada.

Debido a la dificultad para sostener programas de investigación a largo plazo, hasta la fecha existen tan solo tres glaciares en los Andes del Sur (Argentina y Chile) con series relativamente extensas de observaciones continuas, y ninguna de ellas se encuentra en los Andes de Patagonia Norte. Por lo tanto, contar con un glaciar de referencia, que sea representativo de los cambios en la región, es una herramienta clave para el monitoreo del estado de la criosfera en los Andes del Sur. Si bien este trabajo se limita al análisis de las fluctuaciones morfológicas del Alerce, la información generada puede ser utilizada en estudios que contemplen un número mayor de variables, que permitan profundizar nuestra comprensión de la variabilidad climática natural, poner en contexto el cambio climático que estamos atravesando y cuantificar sus impactos en zonas de montaña.

**Palabras clave:** cambio climático, Andes de Patagonia Norte, fluctuaciones glaciares, glaciar Alerce.



## ABSTRACT

In recent decades, glacier retreat has been observed in all the world's mountain ranges. Over the last 20 years, glaciers in the Andes have lost mass at one of the highest rates on record. The loss is more accentuated in the tropical Andes and the Patagonian Andes. Particularly, glaciers in the northern Patagonian Andes show the highest rate of loss of all the Andean regions for the last decade. In order to identify change trends and models of how glaciers may be affected by possible climate change scenarios, it is crucial to have data series that cover longer time scales. Hence, in the present study, a reconstruction of the extension (length and area) of the Alerce glacier (41°09'S – 71°49'W) for the last 70 years was carried out in order to evaluate its weighting as a reference glacier for North Patagonian Andes.

Historical photographs of the front were replicated, and a map of the Alerce was digitized, created by S. Rubulis, J.C. Leiva y J. Suarez, professionals of Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA) from 1953-1983, in order to enhance the historical documentation of the Alerce. Based on the interpretation of this data and the use of geographic information systems (QGIS 3.18.2), detailed mapping of glacier fluctuations for the period 1953-2020 was generated. Four methodologies were evaluated to quantify changes in front position: i) central flow line; ii) curvilinear box; iii) multiline; iv) variable box. Finally, the changes observed were analyzed and compared with the series of the Esperanza Norte and Frías glaciers.

Changes in the area and front position show a marked retreat during the last 70 years. The glacier lost 35% of its surface and reached a cumulative retreat of  $1.49 \pm 0.04$  km. However, the results of front variations vary considerably depending on the methodology applied. The most appropriate method for the Alerce case is the variable box method, since it considers the variation in the amplitude of the front. It is possible to distinguish different patterns of change over time. In the first instance, there was a period of regression (until the end of the '60s), followed by a period of progress or relative stability (in the '70s), then a strong regression (in the '80s-'90s) and finally, a period of relatively low retraction ('00s-'10s onwards). A comparison of these changes with the best documented series in the region shows a similar pattern of behavior, even on a decadal scale. Therefore, its weighting as a reference glacier for North Patagonian Andes seems to be correct.

Due to the difficulty of sustaining long-term research programs, to date there are only three glaciers in the Southern Andes (Argentina and Chile) with relatively extensive series of continuous observations, and none of them are in the North Patagonian Andes. Therefore, having a reference glacier that is representative of changes in the region is a key tool for monitoring the state of the cryosphere in the Southern Andes. Although this work is limited to the analysis of the morphological fluctuations of Alerce, the information generated can be used in studies that contemplate a larger number of variables, allowing us to deepen our understanding of natural climate variability, to put into context the climate change we are undergoing and to quantify its impacts in mountain areas.

**Key words:** climate change, North Patagonian Andes, glacier fluctuations, Alerce glacier.



## **AGRADECIMIENTOS**

*Desde lo más sincero le agradezco a mi familia, por ser el sostén y gran parte del motor de todo lo transitado. Por todo el esfuerzo, tolerancia y compañía que hay detrás de estos años de facultad, y los años que le preceden.*

*A Nati, quien sin duda fue la persona que más cerca estuvo, acompañando, brindando, conteniendo, abrazando, explorando, motivando, escuchando y cebando matecitos. Una persona que admiro profundamente en toda la inmensidad de su forma de ser.*

*A mis amigas y amigos de facultad, que hicieron de este tiempo una hermosa senda llena de emociones tan intensas y diversas, que con tanto amor voy (y vamos) a recordar:*  
*a Juanfra, por enseñarme a confiar y creer en mí;*  
*a Marti, por ser su fantástica forma de ser y renacer, que es tan contagiosa;*  
*a Berni, por ser imprescindible en cada momento de la vida;*  
*a Mari, porque cada espacio compartido fue más liviano en su presencia;*  
*a Bruno, por enseñarme a vivir la ciencia de manera apasionante y divertida;*  
*a Luji, por transmitir ese aliento y esa locura de animarse a todo lo que nos llama la atención;*  
*a Juanito, por la transparencia que lo nombra y porque sin el nada hubiera sido tan divertido;*  
*a Maiki, por llevar siempre aires de montaña;*  
*a Marcus, por tantas risas, discusiones, mesas, historias y redescubrimientos que compartimos;*  
*a John, por ser un ejemplo en tantos sentidos que me queda corto el espacio;*  
*a Luci, Carro, Meli, Yesi, Belén, Sosi, Sol, Cindi, Peñi, Luisi, Mati, Juana, Sandi, Cari, Chen, Ari, Sofi, Andrés y tantas personas más que fueron aire y compañía linda estos años.*

*A Manitta, Emma, Mark, Cheky, Bazan, Franquito, Benja, Nico, Tomi, Porteño, Piono, Rodri, Tincho, Topa, Maxi y Eze, mis amigos de distintos caminos, que apoyaron desde otro ángulo tan necesario.*

*A Lucas y Pierre, por abrirme las puertas, creer, confiar y con tanta paciencia enseñarme a caminar en el hielo.*

*A Lauti, por acompañar este hermoso aprendizaje desde el corazón y por la motivación que transmite para descubrir y entender los ambientes de montaña.*

*A Julieta, Sebastián y Andrés, que se tomaron el trabajo de ayudarme a enriquecer esta instancia.*

*Al grupo ELERNYMA, ese espacio dinámico de gente que tantas veces me hizo crujir la cabeza, compartir viajes y experiencias con personas de diversas culturas y lugares.*

*A la Universidad Nacional de Cuyo y la Facultad de Ciencias Agrarias, porque desde un espacio público, laico y gratuito, se construye conocimiento gracias a las enormes capacidades y buena voluntad de la gente que la integra. Que educar en valores siga siendo parte de la calidad académica.*

*A las y los docentes que apasionadamente transmiten sus conocimientos, empatía y creen en la educación.*

*“La poderosa obra continúa”  
Walt Whitman*



## ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	HIPÓTESIS .....	2
3.	OBJETIVOS .....	3
3.1.	General.....	3
3.2.	Específicos .....	3
4.	MARCO CONCEPTUAL.....	3
4.1.	Glaciares.....	3
4.2.	Cambios en la morfología glaciar .....	4
4.3.	Glaciares y clima .....	4
4.4.	Dinámica glaciar .....	5
4.5.	Andes del Norte de la Patagonia.....	6
4.5.1.	Clima de la región .....	6
4.5.2.	Glaciares de la región .....	7
4.5.2.1.	Glaciar Alerce.....	7
5.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	8
5.1.	Puesta en valor de los documentos históricos sobre el glaciar Alerce.....	8
5.2.	Cartografía de detalle del glaciar Alerce para el período 1953-2020 .....	10
5.3.	Análisis de las series de fluctuaciones del Alerce y su relación con las series de referencia de la región.....	13
6.	RESULTADOS .....	16
6.1.	Puesta en valor de los documentos históricos sobre el glaciar Alerce.....	16
6.2.	Cartografía de detalle del glaciar Alerce para el período 1953-2020 .....	19
6.3.	Análisis de las fluctuaciones del Alerce y su relación con las series de referencia de la región.....	20
7.	DISCUSIÓN.....	27
7.1.	Documentación histórica del glaciar Alerce.....	27



7.2. Metodologías aplicadas para determinar la posición del frente.....	28
7.3. Análisis de las fluctuaciones del Alerce en comparación con las series de referencia para la región.....	30
8. CONCLUSIONES.....	32
9. BIBLIOGRAFÍA.....	33
10. ANEXO.....	40

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación de un sistema glaciar junto con los procesos de transferencia de masa y energía que ocurren dentro, y los procesos que dependen de la interacción de la masa de hielo con la atmósfera próxima y el medio. Fuente: Schoolmeester et al. (2018).....	3
Figura 2. Ubicación relativa del glaciar Alerce. La línea blanca de trazo discontinuo representa el límite político entre Argentina y Chile. Capas: límites de glaciares del Tronador tomados de Ruiz y colaboradores (2017); curvas de nivel obtenidas del modelo SRTM-4; Imagen de base Pléiades (2019) y ESRI. ....	8
Figura 3. Mapa histórico de las posiciones del frente del glaciar Alerce para el período 1953-1983 (S. Rubulis, J.C. Leiva y J. Suarez). Fuente: IANIGLA.....	9
Figura 4. Metodologías aplicadas para determinar las fluctuaciones del frente del Alerce (1953-2020): línea de flujo central (A); multilíneas (B); caja curvilínea de 400m (C); y caja variable (D). ....	14
Figura 5. Fotografías del frente del Alerce desde la perspectiva del lago homónimo. Fotografías: S. Rubulis (1977) y J.C. Ghilardi Truffa (2020). ....	17
Figura 6. Fotografías del frente del Alerce desde la perspectiva del margen sur. Fotografías: S. Rubulis (1977) y J.C. Ghilardi Truffa (2020). Fuente: elaboración propia.....	18
Figura 7. Mapa histórico de las fluctuaciones del frente del glaciar Alerce georreferenciado (A). El fondo de los mapas corresponde a una imagen Pléiades (2019). En las figuras laterales se esquematizan los criterios de evaluación que se aplicaron al resultado de la georreferenciación: diferencia entre los márgenes del río y del lago (B); distancia entre punto de referencia y frente de 1953 (C); y la diferencia entre la escala del mapa (D). ....	19
Figura 8. Cartografía de detalle del glaciar Alerce para el período 1953-2020. La imagen de fondo corresponde a una imagen Pléiades (2019).....	20
Figura 9. Cambios en el área del glaciar Alerce. Las barras representan el nivel de error. El color de los marcadores indica la fuente de información utilizada en la digitalización; según mapa histórico (violeta), foto aérea (rojo) o imagen satelital (azul). ....	21
Figura 10. Cambios en la posición del frente del glaciar Alerce según cada metodología aplicada. Las barras representan el nivel de error. ....	23



Figura 11. Cambios en la posición del frente del Alerce (normalizados) según cada metodología..... 24

Figura 12. Cambios en la posición del frente del glaciar Alerce. La serie de variación del frente se construye en base al método de caja variable. El color de los marcadores indica la fuente de información utilizada en la digitalización; según mapa histórico (violeta), foto aérea (rojo) o imagen satelital (azul). Las barras representan el nivel de error..... 25

Figura 13. Cambios en la posición del frente de los glaciares Esperanza Norte, Frías y Alerce. Datos: Leclercq et al., 2012 y Ruiz et al., 2012. .... 26

Figura 14. Cambios en la posición del frente (normalizados) del glaciar Esperanza Norte, Frías y Alerce. Datos: Leclercq et al., 2012 y Ruiz et al., 2012. .... 27

Figura 15. Comparación de los cambios en la posición del frente según los registros del mapa histórico y las variaciones obtenidas según los métodos de línea de flujo central y caja variable. .... 28

Figura 16. Variaciones en el ancho del frente del Alerce. En 1953 el ancho era de ~100m y aún no existía el lago proglaciar; en 1970 la amplitud es de ~250m y el frente está en contacto con el lago; para el 2000 el glaciar ya perdió completamente su lengua y el ancho del frente es de ~880m, evidenciando una marcada irregularidad; actualmente (2020) el ancho es de ~785m y presenta menos irregularidad entre los márgenes y la zona central. .... 29

Figura 17. Variación altimétrica del frente del glaciar Alerce, para el período 1953-2020. Datos: generados a partir de una transecta del modelo digital de elevación SRTM-4. .... 30

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Lista de datos de entrada utilizados para generar la cartografía de detalle del glaciar Alerce. Para aquellas celdas donde no corresponda ingresar información figura la abreviatura “N/C”. Fuente: Las imágenes Landsat y Corona se obtuvieron del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS); Las imágenes Pléiades fueron provistas sin costo por Airbus Defence and Space; El mapa se obtuvo de los archivos del IANIGLA; Las fotografías aéreas se obtuvieron del Instituto Geográfico Nacional de la República Argentina (IGN). .... 10

Tabla 2. Registro de interpretaciones para el período 1953-1983, en función de la fuente de información utilizada para el mapeo de los márgenes de la lengua y la zona de acumulación. .... 12



## 1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento abrupto de los sistemas productivos y extractivistas que se produjo luego de la segunda revolución industrial, afectó considerablemente el clima y el medio ambiente. Transitando la tercera ola revolucionaria de la industria, y a punto de entrar a la cuarta (Hwang, 2016), no se han logrado aplicar las políticas y acciones intergubernamentales necesarias para revertir, o limitar significativamente, el impacto ocasionado por el desarrollo insostenible que rige hace más de 200 años (Arboit y de Rosa, 2014).

La pérdida de biodiversidad, la alteración de los ciclos biogeoquímicos y el cambio climático, han superado ampliamente los umbrales de resiliencia y estabilidad que tiene nuestro planeta (O'Neill et al., 2018; Plataforma Intergubernamental sobre Biodiversidad y Servicios de Ecosistemas [IPBES], 2019). A su vez, el cambio climático antropogénico ha generado un aumento de la temperatura global, una variación en la distribución de las precipitaciones y un aumento en la frecuencia de eventos climáticos extremos, con serias repercusiones socio-económicas a nivel global (Panel Intergubernamental de Cambio Climático [IPCC], 2021).

En las últimas décadas se ha observado un retroceso de los glaciares en todos los cordones montañosos del mundo (Hugonnet et al., 2021; Zemp et al., 2015, 2019). En los últimos 20 años, los glaciares de los Andes perdieron masa a una de las tasas más altas registradas ( $-22.9 \pm 5.9 \text{ Gt yr}^{-1}$ ) (Dussaillant et al., 2019), equivalente a la cantidad de agua necesaria para abastecer a toda la población de Latinoamérica durante un año aproximadamente (Comisión Económica para América Latina [CEPAL], 2017; Organización Mundial de la Salud [OMS], 2003). La pérdida de masa glaciar ha sido más acentuada en los Andes tropicales y Andes Patagónicos; en particular, en los Andes del Norte de Patagonia se observa un fuerte aumento de la pérdida de masa para el período 2009-2018 con respecto al 2000-2009 (Dussaillant et al., 2019).

Si bien el conocimiento sobre el estado de la criósfera Andina ha aumentado considerablemente en los últimos años, los estudios a nivel de detalle aún son escasos (Masiokas et al., 2020). Para mejorar la comprensión de los procesos que actúan detrás de los cambios que observamos en los distintos componentes de la criósfera, es crucial contar con series de datos que abarquen escalas temporales más amplias (Masiokas et al., 2007), donde puedan identificarse tendencias que permitan modelar cómo pueden verse afectados estos recursos naturales frente a posibles escenarios de cambio climático (IPCC, 2021).

En diferentes regiones del planeta existen glaciares de referencia, a través de los cuales se pretende proporcionar una muestra fiable y bien documentada de observaciones distribuidas por todo el mundo, para monitorear el impacto del cambio climático en la criósfera (Fountain et al., 2009; Singh et al., 2011). Un glaciar de referencia es un glaciar que cuenta con más de 30 años de mediciones directas de balance de masa, morfología (largo y área), mediciones sobre su entorno meteorológico e hidrológico, y que debe ser representativo de una región determinada (Zemp et al., 2008; Singh et al., 2011). A pesar de ello, se han observado casos donde glaciares de referencia no son buenos indicadores para su región (Fountain et al., 2009).

Actualmente la distribución de los glaciares de referencia se concentra en el hemisferio norte (WGMS, 2021). El glaciar Echaurren Norte (Farías-Barahona et al., 2019) es el único glaciar de referencia ubicado en Latinoamérica y también es el único en el hemisferio sur (WGMS, 2021). Para alcanzar una cobertura global, deberían establecerse nuevos glaciares de referencia para las regiones que no se encuentran representadas actualmente (Singh et al., 2011). En la elección de nuevos glaciares de referencia, se debe tener un abordaje holístico, que considere las características climáticas de la región y las propias de cada glaciar (morfología, dinámica, cobertura de detritos, accesibilidad, etc.) con el objetivo de lograr una buena representatividad (Singh et al., 2011). En particular, la carencia de mediciones



sistemáticas de balance de masa y de series con cronologías relativamente extensas para los Andes del Sur (Masiokas et al., 2020) genera una gran dificultad en esta labor.

Dentro de la estrategia de realización del Inventario Nacional de Glaciares de Argentina (Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales [IANIGLA], 2010) se plantean tres niveles de trabajo. El objetivo del primer nivel es la identificación y caracterización de todos los glaciares y crioformas del ambiente periglacial, que actúan como reservas hídricas estratégicas en la Argentina. En el segundo se busca conocer la variación temporal de los cuerpos de hielo inventariados. Mientras que el tercer nivel tiene como objetivo establecer los factores ambientales que regulan el comportamiento de los glaciares y crioformas, y determinar la significancia hidrológica a la escorrentía andina (IANIGLA, 2010). Para este último nivel se seleccionó un glaciar de referencia en cada una de las diferentes regiones de los Andes (Argentina), siendo el glaciar Alerce el referente para los Andes de Patagonia Norte. Sin embargo, hasta la fecha no se cuenta con información suficiente como para evaluar su ponderación como glaciar de referencia para la región (Ruiz et al., 2012; Masiokas et al., 2009, 2020).

Cuantificar las fluctuaciones del frente de manera precisa y consistente es crucial para el monitoreo de los glaciares y su relación con el clima (Cogley et al., 2011; Lea et al., 2014; Oerlemans, 2001). A pesar de que existen diferentes metodologías para determinar la posición del frente de un glaciar, usualmente se utiliza el método de *línea central de flujo*, debido a su simplicidad y aplicabilidad en un rango amplio de casos (Lea et al., 2014). Sin embargo, para aquellos cuerpos de hielo que presentan fluctuaciones irregulares, se corre el riesgo de caer en errores significativos con esta metodología (Lea, 2018; Lea et al., 2014). Hasta el momento, no se cuenta con información precisa de las fluctuaciones del frente del glaciar Alerce; por lo cual, resulta oportuno contrastar diferentes metodologías para encontrar la que mejor se ajuste al caso.

En el presente estudio se realiza una reconstrucción de la extensión (largo y área) del glaciar Alerce para los últimos 70 años, con el objetivo de contribuir a un conocimiento más completo y detallado de las variaciones glaciares en los Andes del Norte de Patagonia. La información generada permitirá explotar aún más los datos sobre el balance de masa, velocidad superficial, espesor de hielo, meteorología y escorrentía obtenidas por el IANIGLA en el marco del Inventario Nacional de Glaciares. A su vez, contar con un glaciar de referencia para los Andes del Sur, con información de un alto nivel de detalle, representa una valiosa herramienta para formular estrategias de desarrollo y adaptación al cambio climático en la región andina (Schoolmeester et al., 2018). El monitoreo de la criósfera y la gestión estratégica del recurso hídrico en zonas de montaña son ejes cruciales para garantizar un desarrollo sostenible dentro de la coyuntura socioambiental que nos ocupa (O'Neill et al., 2018; Schoolmeester et al., 2018).

## **2. HIPÓTESIS**

Las variaciones de largo y área del glaciar Alerce, en los últimos 70 años, son similares a las series de referencia para los Andes del Norte de la Patagonia.

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1. General

Reconstruir el largo y área del glaciar Alerce, y analizar su relación con series de referencia de la zona para los últimos 70 años.

#### 3.2. Específicos

3.2.1. Poner en valor los documentos históricos sobre el glaciar Alerce

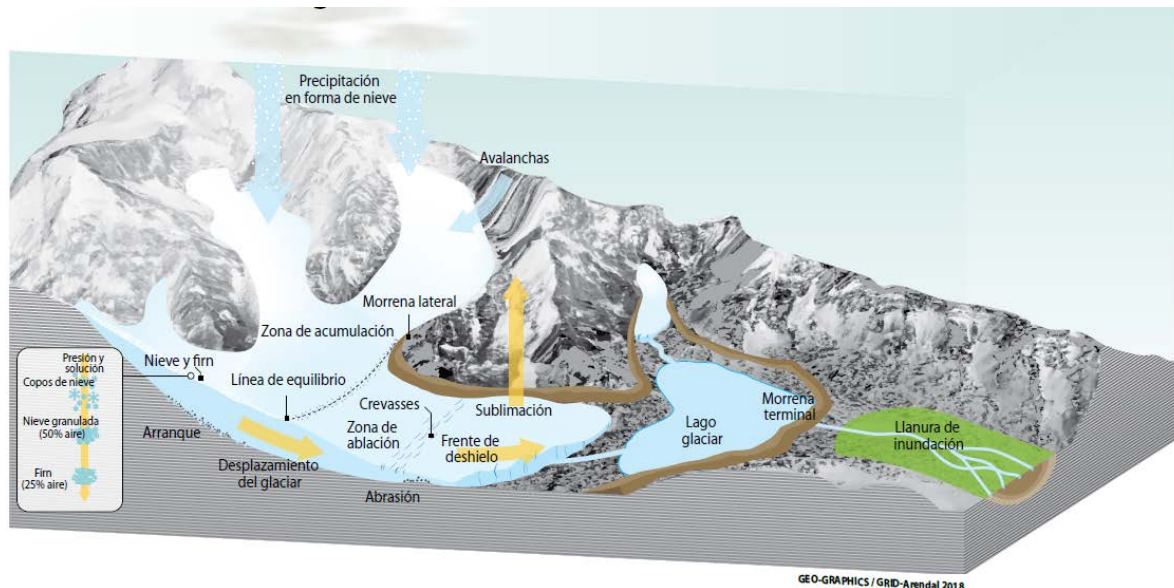
3.2.2. Generar cartografía de detalle del glaciar Alerce para el período 1953-2020

3.2.3. Analizar las series de fluctuaciones del glaciar Alerce y su relación con las series de referencia de la región

### 4. MARCO CONCEPTUAL

#### 4.1. Glaciares

Los glaciares son masas de hielo que se forman por la acumulación, compactación y recristalización de la nieve (Cogley et al., 2011). Para que se desarrolle un glaciar es necesario que la nieve se acumule año tras año. Los glaciares fluyen como lentos ríos de hielo, deformándose y fracturándose a medida que transportan el hielo formado en las partes altas de la montaña (zona de acumulación) hacia las partes bajas (zona de ablación), donde el calor del verano no solo no permite que la nieve se acumule año tras año, sino que también derrite el hielo de los glaciares, aportando agua a los ríos. A su vez, los glaciares son sistemas abiertos, que se encuentran en constante interacción con la atmósfera inmediata y el ecosistema (ver figura 1) (Cogley et al., 2011; Cuffey y Paterson, 2010).



**Figura 1.** Representación de un sistema glaciar junto con los procesos de transferencia de masa y energía que ocurren dentro, y los procesos que dependen de la interacción de la masa de hielo con la atmósfera próxima y el medio. Fuente: Schoolmeester et al. (2018).

La zona de acumulación (ganancia neta de masa) y la zona de ablación (pérdida neta de masa) se encuentran separadas por la línea de equilibrio, que se define como el conjunto de



puntos donde la acumulación es igual a la ablación en un período de tiempo (Cogley et al., 2011; Singh et al., 2011). La altura de la línea de equilibrio (ELA) es la altitud promedio de la línea de equilibrio, dado que rara vez puede observarse como una línea a la misma altura en todo el ancho del glaciar debido a las variaciones topográficas y climáticas locales. Particularmente, la ELA está muy relacionada con las precipitaciones invernales y la temperatura estival (Singh et al., 2011). Actualmente existen glaciares que se encuentran por debajo de la línea de equilibrio actuando en su totalidad como zona de ablación en temporada estival (Rico Lozano, 2019).

Los glaciares tienen un rol clave en la dinámica de los ecosistemas de zonas montañosas (Hock et al., 2019; Kaser et al., 2010). Brindan servicios ecosistémicos asociados al aprovisionamiento y reservorio de agua dulce, la regulación de la temperatura, calidad y cantidad de agua que escurre por los cauces, y servicios culturales, estéticos y espirituales (Schoolmeester et al., 2018; Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 2019). En zonas áridas y semi-áridas, los glaciares funcionan como “amortiguadores” del caudal de los ríos, disminuyendo el impacto de las sequías (Ayala et al., 2019).

Contar con registros de variaciones de la extensión de los glaciares de largo plazo es crucial para mejorar nuestra comprensión de la variabilidad climática, poner en contexto el cambio climático que estamos atravesando y cuantificar el impacto en zonas de montaña (Nussbaumer et al., 2011; Schoolmeester et al., 2018).

#### **4.2. Cambios en la morfología glaciar**

Los cambios en la morfología de los glaciares se pueden analizar a partir del estudio de cambio de largo, área, masa o volumen. Para medir estos cambios se han desarrollado diversas técnicas observacionales, con diferentes escalas espaciales y temporales (Masiokas et al., 2020). Los cambios en el largo de los glaciares son tradicionalmente obtenidos a partir de mediciones anuales de la posición del frente.

En las últimas décadas, y sobre todo en regiones de difícil acceso, se utilizan fotografías aéreas e imágenes satelitales para determinar cambios en los glaciares. En particular, el avance continuo en la precisión y resolución espacial de las imágenes satelitales, su creciente accesibilidad y el ajuste de metodologías, han permitido un aumento en el uso y la precisión de los estudios de cambios de área y largo de glaciares a través del uso de sensores remotos (Colgan et al., 2016; Paul et al., 2007).

Sin embargo, la ausencia de imágenes satelitales para los años anteriores a las décadas de los 70 y 80 limitan los estudios a una cronología relativamente acotada. Para conocer cómo fueron los glaciares en el pasado existen diversas técnicas que permiten inferir su extensión, morfología y espesor, como pueden ser estudios geomorfológicos combinado con técnicas de datación (Villalba et al., 1997). Por otro lado, los registros históricos (mapas antiguos, fotografías o crónicas) nos dan la posibilidad de generar un registro detallado de las fluctuaciones glaciares en escalas decadales (hasta incluso anuales), pudiendo obtenerse datos cualitativos o cuantitativos sobre la morfología o volumen de los glaciares de hasta varios siglos atrás (Nussbaumer et al., 2011).

#### **4.3. Glaciares y clima**

La forma de los glaciares (área y largo) está relacionada con el clima. Si un glaciar está en equilibrio con el clima su tamaño no cambia. Sin embargo, si el clima varía, por ejemplo, produciéndose un enfriamiento o aumentando la acumulación de nieve en las zonas altas de



la montaña, el glaciar va a avanzar (extendiendo su zona de ablación), para así contrarrestar la mayor acumulación. Mientras que, si ocurre lo contrario, el glaciar va a retraerse a zonas más elevadas en consecuencia del mayor derretimiento (Cogley et al., 2011). Dependiendo de la velocidad y magnitud del cambio en el clima, pero también del tamaño y la capacidad de fluir del glaciar, el glaciar va a tardar más o menos en alcanzar un nuevo equilibrio (Oerlemans, 2001).

Existen factores que pueden condicionar la respuesta de los glaciares a los cambios del clima. La topografía, orientación, el contacto con un cuerpo de agua, la cobertura de detritos, geometría, altitud, entre otros, influyen en la dinámica del glaciar, provocando un mayor o menor flujo de acuerdo a cómo varíen (Anderson y Anderson, 2010; Cuffey y Paterson, 2010). Por lo tanto, puede que existan patrones de respuesta diferentes incluso si la señal climática en la región es la misma para todos los glaciares (Arendt et al., 2009; Rico Lozano, 2019). A su vez, puede suceder que un glaciar responda inicialmente a una variación climática y luego de cierto período de tiempo se comporte de manera independiente al clima; como es el caso de algunos glaciares en *calving* (Meier y Post, 1987).

#### **4.4. Dinámica glaciar**

El flujo glaciar es el desplazamiento del hielo sobre el relieve que genera procesos erosivos, de transporte y deposición de material en diferentes zonas del glaciar (Jiskoot, 2011; Tarbuck et al., 2013). Las masas de hielo se mueven principalmente por dos procesos diferentes: deformación interna y deslizamiento basal. El flujo interno tiene lugar por la deformación plástica de la estructura de los cristales y se produce en el interior del glaciar como consecuencia de la gravedad, pendiente, espesor y viscosidad del hielo (Bennett y Glasser, 2011). El deslizamiento basal se produce cuando la masa de hielo se desplaza sobre el fondo, experimentando un movimiento heterogéneo condicionado por la dinámica de cada glaciar y las características del lecho. En la base del glaciar puede existir una película de agua líquida y/o sedimentos que reduce la presión basal efectiva, traducido en una disminución del rozamiento, y en efecto, facilitando el movimiento del hielo sobre el lecho glaciar (Tarbuck et al., 2013).

El *Calving*, o dinámica de desprendimiento de témpanos, es un mecanismo de ablación que presentan los glaciares que terminan en cuerpos de agua y es un componente importante de muchos sistemas glaciares en todo el mundo (Benn et al., 2007). Para que el frente de un glaciar en *calving* avance necesita generar un “banco de sedimentos”, a través de la deposición de material, que le permita al cuerpo de hielo reptar sobre un lecho de baja profundidad. Estos procesos de deposición de sedimentos suelen ser lentos y dependen de la velocidad de flujo del hielo, y la posibilidad de construir el banco de sedimentos en aguas profundas (Anderson y Anderson, 2010, Capítulo 8). En cambio, si por alguna razón el glaciar se retira del banco de sedimentos, el aumento en la profundidad del agua generará un aumento repentino de la tasa de *calving*, con la consiguiente retracción del frente. Estos eventos de avances lentos y fuertes retrocesos, suelen repetirse periódicamente en este tipo de glaciares, y son conocidos como ciclos de *calving* (Meier y Post, 1987).

El hecho de que un glaciar se encuentre en contacto con un cuerpo de agua, genera un cambio en la presión efectiva; por lo tanto, un cambio en los procesos físicos actuantes en la masa de hielo (Benn y Evans, 2014). La respuesta de los glaciares frente a estos cambios involucra una variación en la dinámica, que puede estar desacoplada con las variaciones del clima (Anderson y Anderson, 2010, Capítulo 8). No obstante, los procesos que se desencadenan suelen ser diversos y aún está siendo estudiados (Benn et al., 2007).



#### **4.5. Andes del Norte de la Patagonia**

##### **4.5.1. Clima de la región**

El clima de la región se caracteriza por tener un régimen estacional de precipitaciones que se concentran en invierno, moduladas principalmente por las corrientes del Pacífico (Sagredo y Lowell, 2012; Viale y Garreaud, 2015). A estas latitudes (35-45°S) la cordillera forma una efectiva barrera topográfica que regula los aportes de las corrientes del oeste, generando un fuerte gradiente de precipitación este-oeste (Masiokas et al., 2007; Viale y Garreaud, 2015). Los valores de precipitación varían desde ~5000 mm en las laderas occidentales de los Andes, hasta ~1000 mm en las vertientes orientales (Lenaerts et al., 2014; Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 2019; Viale y Garreaud, 2015). A su vez, existe un marcado gradiente norte-sur en la concentración estacional de las precipitaciones que permite dividir la región en dos subgrupos: norte (al norte de los ~42°S) y centro (al sur de los ~42°S), siendo el grupo más septentrional el que recibe mayores precipitaciones (Sagredo y Lowell, 2012).

Al igual que las precipitaciones, existe una marcada estacionalidad en las temperaturas medias mensuales, que descienden hasta los 4-8°C (Chile) o 2-4°C (Argentina) en invierno (Miller, 1976 en Masiokas et al., 2007) y ascienden hasta los 14-18°C en verano (Chile y Argentina) (Prohaska, 1976 en Masiokas et al., 2007). La temperatura media anual presenta un gradiente este-oeste, registrando valores entre 11 y 8 °C, en las zonas costeras de Chile y el límite entre estepa-bosque de Argentina respectivamente (Prohaska, 1976; Miller, 1976 en Masiokas et al., 2007). La isoterma de 0°C fluctúa entre los 1400 msnm (julio) y los 3000 msnm (febrero), alcanzando valores medios anuales de ~2200 msnm aproximadamente (Carrasco et al., 2008), mientras que la línea de nieve se encuentra generalmente por debajo de los 2000 msnm (Sagredo y Lowell, 2012). Estas condiciones ambientales provocan que los glaciares de la región se concentren en los picos más altos y volcanes de la cordillera, ocupando un área relativamente pequeña (Liboutry, 1998 en Masiokas et al., 2007; Sagredo y Lowell, 2012). A su vez, existen numerosos glaciares en la región que se extienden por debajo de la isoterma media anual de 0 °C; en particular, en el Monte Tronador todos los límites frontales de los cuerpos de hielo se encuentran por debajo de los ~1600 msnm (Ruiz et al., 2017).

Desde mediados del siglo pasado hasta la actualidad se ha observado un aumento de la temperatura y una disminución en las precipitaciones de la región (Barros et al., 2015; IPCC, 2021; Rivera et al., 2012 en Paul y Mölg, 2014; Ruiz et al., 2017). Existe un fuerte consenso en que estas variables han tenido un efecto importante en el retroceso glaciar observado para las últimas décadas (Bown González, 2004; Dussailant et al., 2019; Leclercq et al., 2012; Masiokas et al., 2020; Paul y Mölg, 2014; A. Rivera et al., 2005; Ruiz et al., 2017), en conjunto con el efecto de la actividad volcánica (Bown et al., 2012; Gelman Constantin et al., 2020; Paul y Mölg, 2014). Se espera que las tendencias de temperatura y precipitación observadas continúen durante las próximas décadas, en mayor o menor medida dependiendo del escenario proyectado (Barros et al., 2015; Bradley et al., 2004; IPCC, 2021). A su vez, es probable que exista una mayor reducción en las precipitaciones de invierno (Barros et al., 2015). Es necesario seguir trabajando para evaluar las posibles repercusiones ecológicas y socioeconómicas de estas predicciones, dado que será crucial para la generación de estrategias de desarrollo regional y gestión de recursos naturales (Masiokas et al., 2007).



#### **4.5.2. Glaciares de la región**

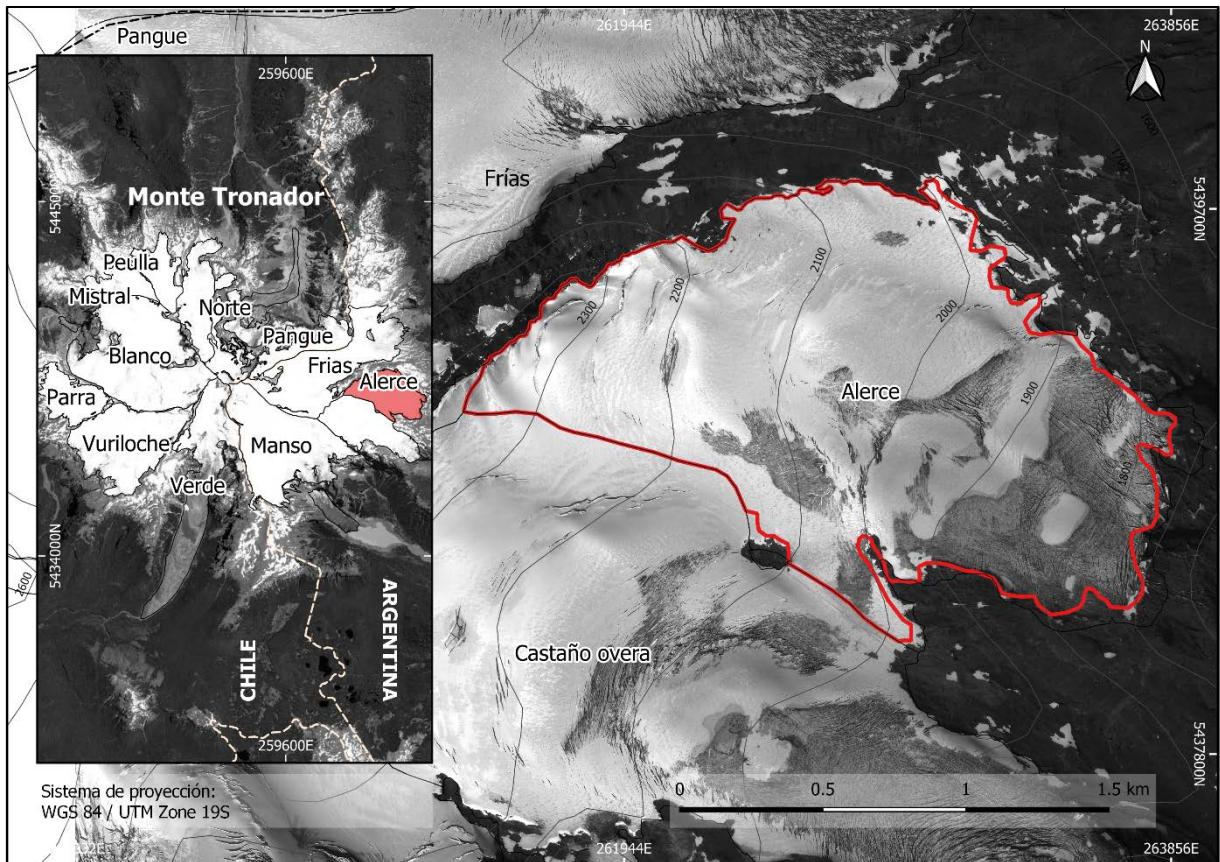
Los Andes del Norte de Patagonia abarcan las cuencas occidentales de Neuquén, Chubut y Santa Cruz, ubicadas entre las latitudes 35-45° S. La altura media de la cordillera es de 1800 msnm y los glaciares descubiertos, que ocupan la mayor superficie de la región (~75%), se ubican alrededor de los 1700 msnm (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 2019). El tipo de cuerpo de hielo más común son los manchones de nieve perennes (~63%), seguidos por los glaciares de montaña (~32%); sin embargo, estos últimos ocupan alrededor del 70% del área glaciada (Barcaza et al., 2017; Zalazar et al., 2020).

En Patagonia Norte, existen dos de las series de variaciones de largo y área más extensas y detalladas de los Andes. El glaciar Esperanza Norte, en el noroeste de Chubut y el glaciar Frías en el Monte Tronador, muestran un patrón de variaciones similar. Ambos glaciares tienen su máximo de la Pequeña Edad de Hielo a mediados del siglo XVII (1650), un pequeño re-avance entre 1970 y 1976 y un fuerte retroceso a finales del siglo XX, seguido por una desaceleración en los últimos años (Leclercq et al., 2012; Ruiz et al., 2012, 2017). La dificultad de acceder y transitar por estos glaciares ha imposibilitado que se desarrollen programas de monitoreo sostenidos en el tiempo para mejorar la comprensión de los procesos que actúan detrás de estos cambios.

Desde el año 2013, en el marco del Inventario Nacional de Glaciares (Ley 26639 de 2010), el IANIGLA realiza un monitoreo del glaciar Alerce. El instituto eligió este glaciar como referente para los Andes de Patagonia Norte debido a que tiene un tamaño, rango altimétrico, orientación y pendiente representativos de la mayoría de los glaciares de la región. Además, es relativamente accesible, lo que implica una gran ventaja a la hora de gestionar la logística. Sin embargo, la información sobre las variaciones de largo y área del Alerce previo al año 2000 son insuficientes como para compararlos con las series mejor documentadas para la región.

##### **4.5.2.1. Glaciar Alerce**

El glaciar Alerce (2.16 km<sup>2</sup> en 2020) es uno de los cuatro principales glaciares argentinos, junto al Manso, Castaño Overo y Frías, del Monte Tronador (41° 9' 38.67" S, 71°53' 6.52" O). Se extiende desde el Filo de La Motte (2400 msnm) hasta los 1650 msnm. Hoy en día, es un glaciar de montaña, aunque en el pasado reciente tenía una lengua que descendía hasta el fondo del valle. Actualmente no cuenta con una cobertura de detritos, tiene una orientación media hacia el sureste y una pendiente media de 10°. Pertenece a la cuenca de los ríos Manso y Puelo, cuyas aguas vierten en el Océano Pacífico. Aguas abajo del glaciar se encuentra un lago proglaciar (lago Alerce), alimentado por el derretimiento de sus hielos.



**Figura 2.** Ubicación relativa del glaciar Alerce. La línea blanca de trazo discontinuo representa el límite político entre Argentina y Chile. Capas: límites de glaciares del Tronador tomados de Ruiz y colaboradores (2017); curvas de nivel obtenidas del modelo SRTM-4; Imagen de base Pléiades (2019) y ESRI.

Al estar ubicado dentro del Parque Nacional Nahuel Huapi, el tercer parque nacional con mayor afluencia turística de Argentina (Sistema de Información de Biodiversidad [SIB], 2019), y contar con la cercanía del refugio Otto Meiling, el glaciar recibe un importante número de visitantes, en particular en los meses de verano. A su vez, cada vez son más las personas que visitan la reserva. En la última década el número de visitantes creció en un 54% (SIB, 2019).

En el glaciar Alerce, los profesionales del IANIGLA S. Rubulis, J.C. Leiva y J. Suarez, generaron una serie de mapas con información sobre la posición del frente del glaciar para el período de 1953-1983, cotas de altura y una breve descripción del paisaje. También, existen registros fotográficos del glaciar de la década de los 70 y fotografías aéreas de la región para los años 1970 y 1981.

## 5. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1. Puesta en valor de los documentos históricos sobre el glaciar Alerce

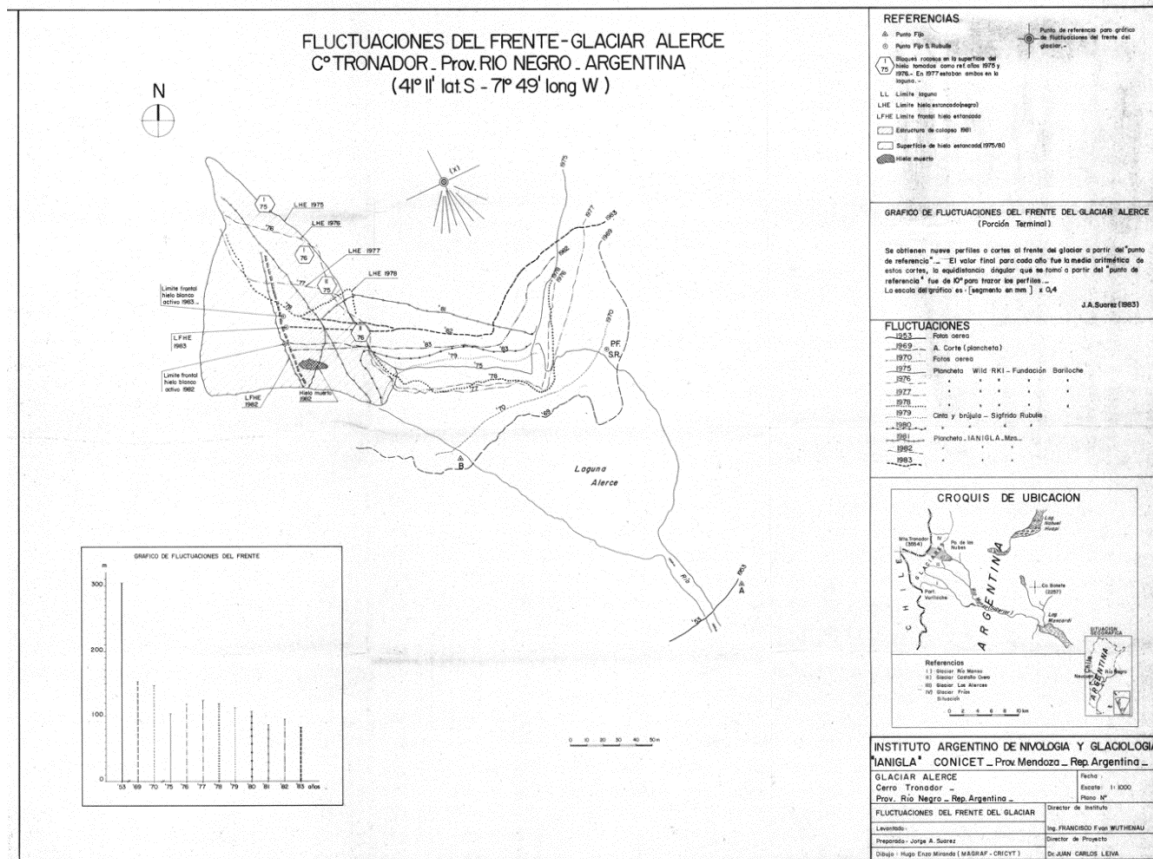
Se buscaron y analizaron publicaciones, documentación, fotografías y mapas históricos del glaciar Alerce en los archivos no publicados del IANIGLA y en bibliografía digitalizada.



Se Identificaron y georreferenciaron puntos panorámicos donde se tomaron fotografías históricas del glaciar, utilizando como referencia la descripción del área donde fueron tomadas las fotografías y los conocimientos de campo de los profesionales del IANIGLA. Por último, se tomaron fotografías actuales con el mismo enfoque que las fotografías históricas del glaciar.

El mapa histórico que contiene información de las posiciones del frente (1953-1983) (ver figura 3) está en un sistema de coordenadas locales, pero contiene puntos de referencia bien definidos (punto A, B y P.F.S.R.). Se identificaron dichos puntos en campo y se tomaron sus coordenadas mediante el uso de GNSS en modo diferencial. A partir de la ubicación de precisa de estos puntos, la información disponible de fotografías aéreas y la identificación de rasgos característicos del paisaje, se georreferenció el mapa utilizando el complemento Georreferenciador en el software QGIS (3.18.2). Se aplicó una transformación lineal y se utilizó como método de remuestreo el método de vecino más cercano.

Para evaluar el resultado de la georreferenciación se tuvo en cuenta: i) la cantidad de puntos de control utilizados; ii) el error residual medio; iii) el ajuste de los bordes del lago y el río observados en el mapa (1953-1983) respecto a la imagen Pléiades (2019); iv) la diferencia entre la escala del mapa (segmentos de 10 m) y segmentos de igual longitud, generados con la herramienta *Medir línea* de QGIS (3.18.2); v) y por último, la diferencia de la distancia entre el *punto de referencia* del mapa (punto x) y el límite frontal del glaciar para el año 1953, y un segmento de igual longitud generado con la herramienta *Medir línea* de QGIS (3.18.2).



**Figura 3.** Mapa histórico de las posiciones del frente del glaciar Alerce para el período 1953-1983 (S. Rubulis, J.C. Leiva y J. Suarez). Fuente: IANIGLA.



## 5.2. Cartografía de detalle del glaciar Alerce para el período 1953-2020

### 5.2.1. Datos de entrada

Se utilizaron fotografías aéreas y el mapa histórico del glaciar (1953-1983). Para los años posteriores a 1985, se utilizaron imágenes del programa Landsat (resolución espacial = 30m) y la constelación Pléiades (resolución espacial = 1 m). Las imágenes satelitales que se utilizaron son de fines de verano para evitar el efecto la cobertura de nieve estacional, que enmascara los límites del glaciar. A su vez, en función de la disponibilidad de imágenes, se seleccionarán aquellas que tengan menor cobertura de nubes y no presenten errores de satélite (bandedo); esto último hace referencia al SCL-off que afectó al producto de Landsat-7 y su sensor ETM+ (Wulder et al., 2008). Las imágenes utilizadas figuran en la tabla 1.

**Tabla 1.** Lista de datos de entrada utilizados para generar la cartografía de detalle del glaciar Alerce. Para aquellas celdas donde no corresponda ingresar información figura la abreviatura "N/C". Fuente: Las imágenes Landsat y Corona se obtuvieron del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS); Las imágenes Pléiades fueron provistas sin costo por Airbus Defence and Space; El mapa se obtuvo de los archivos del IANIGLA; Las fotografías aéreas se obtuvieron del Instituto Geográfico Nacional de la República Argentina (IGN).

<i>Fuente de la información</i>	<i>ID</i>	<i>Fecha</i>	<i>Resolución espacial</i>
<i>Mapa histórico</i>	N/C	1953 - 1983	N/C
<i>Foto aérea</i>	N/C	1969	1 m
<i>Corona</i>	DZB1215-500118L002001	06/03/1979	6-9 m
<i>Landsat</i>	LT05_232089_19850307	07/03/1985	30 m
<i>Landsat</i>	LT05_232089_19860326	26/03/1986	30 m
<i>Landsat</i>	LT05_232089_19870329	29/03/1987	30 m
<i>Landsat</i>	LT05_232089_19980207	07/02/1998	30 m
<i>Landsat</i>	LT05_232089_19990210	10/02/1999	30 m
<i>Landsat</i>	LT05_232089_20050330	30/03/2005	30 m
<i>Landsat</i>	LT05_232089_20060402	02/04/2006	30 m
<i>Landsat</i>	LT05_232089_20070405	05/04/2007	30 m
<i>Landsat</i>	LT05_232089_20080219	19/02/2008	30 m
<i>Landsat</i>	LT05_232089_20090410	10/04/2009	30 m
<i>Landsat</i>	LT05_232089_20110211	11/02/2011	30 m



<i>Landsat</i>	LE07_232089_20000221	21/02/2000	30 m
<i>Landsat</i>	LE07_232089_20010412	12/04/2001	30 m
<i>Landsat</i>	LE07_232089_20020415	15/04/2002	30 m
<i>Landsat</i>	LE07_232089_20030317	17/03/2003	30 m
<i>Landsat</i>	LE07_232089_20040319	19/03/2004	30 m
<i>Landsat</i>	LE07_232089_20100405	05/04/2010	30 m
<i>Landsat</i>	LE07_232089_20120410	10/04/2012	30 m
<i>Pleiades</i>	DS_PHR1A_201204211445393_SEPX_W072S40220_01654	21/04/2012	1 m
<i>Landsat</i>	LE07_232089_20130208	08/02/2013	30 m
<i>Landsat</i>	LC08_232089_20140219	19/02/2014	30 m
<i>Landsat</i>	LC08_232089_20150326	26/03/2015	30 m
<i>Landsat</i>	LC08_232089_20160312	12/03/2016	30 m
<i>Landsat</i>	LC08_232089_20170211	11/02/2017	30 m
<i>Landsat</i>	LC08_232089_20180302	02/03/2018	30 m
<i>Landsat</i>	LC08_232089_20190217	17/02/2019	30 m
<i>Pleiades</i>	DS_PHR1A_201903111448379_FR1_PX_W072S42_0221_01578	11/03/2019	1 m
<i>Landsat</i>	LC08_232089_20200408	08/04/2020	30 m
<i>Pleiades</i>	DS_PHR1A_201204211445393_SEPX_W072S40220_01654	02/03/2020	1 m

---

### 5.2.2. Cartografía del glaciar Alerce

En función de las imágenes históricas se interpretó el contorno del glaciar para cada año y se generó manualmente una serie de polígonos mediante el uso del software QGIS (3.18.2). Para la delimitación de los bordes se tuvieron en cuenta criterios de cambio de tonalidad y las características topográficas del terreno (Frey et al., 2010; Paul y Andreassen, 2009; Ghilardi y Ruiz, 2020; Loriaux y Ruiz, 2021).

Para aquellos años donde no se cuenta con información de los bordes (zonas en sombra o sin información), se mantuvieron los límites interpretados a partir de la imagen más cercana a la fecha. En particular, para el período 1953-1983 sólo se cuenta con datos de la posición del frente del glaciar; por lo cual, la falta de información respecto a los márgenes se compensó en base a las imágenes disponibles (ver tabla 2).



Bajo el supuesto de que el límite superior de la zona de acumulación (cabecera) no ha cambiado significativamente para el período analizado, se delimitó en base a una imagen Pléiades (2012) y se mantuvo fijo para el resto de las interpretaciones. Esto tiene como finalidad disminuir el error de interpretación de bordes para esa zona del glaciar.

**Tabla 2.** Registro de interpretaciones para el período 1953-1983, en función de la fuente de información utilizada para el mapeo de los márgenes de la lengua y la zona de acumulación.

<i>Período de tiempo</i>	<i>Fuente de información para márgenes de la lengua y zona de acumulación</i>	<i>Año de la imagen</i>	<i>ID de la imagen</i>
1953 – 1975	Fotografía aérea	1969	No corresponde
1976 – 1981	Imagen satelital Corona	1979	No corresponde
1983	Imagen satelital Landsat	1985	LT05_232089_19850307

Para calcular el error de los polígonos generados, se consideraron dos fuentes de error: i) el error asociado al proceso de georreferenciación; ii) y de mapeo (o interpretación) de los límites del glaciar (Hall et al., 2003).

El error de georreferenciación ( $e_1$ ) se consideró igual al error residual medio para el caso del mapa histórico y fotografías aéreas. Para las imágenes Pléiades se consideró un error de 0.5 m (Ruiz et al., 2015) y para imágenes Landsat 5 y 8, un error de 12 m (USGS-EROS, 2018; Wulder et al., 2019). El error de mapeo ( $e_2$ ), se estimó calculando la diferencia media entre el área de los polígonos mapeados en base a imágenes Pléiades (2012, 2019 y 2020), y aquellos mapeados en base a imágenes Landsat para los mismos años. Sin embargo, esta estimación no es directamente aplicable a las interpretaciones realizadas en base al mapa histórico. Por lo tanto, para estimar el error de mapeo para los años anteriores a las imágenes satelitales ( $e_{2\text{ Mapa}}$ ), se utilizó el valor medio del error de interpretación  $e_2$ , relativo a las imágenes satelitales sobre el total del área para cada año (ver ecuación 1).

$$e_{2j\text{ Mapa}} = A_{mj} * \frac{\sum_{i=0}^n (e_2 / A_i) * 100}{n} \quad \text{ecuación 1}$$

Donde:

$e_{2j\text{ Mapa}}$  es el error de mapeo de los polígonos generados en base al mapa histórico para el año j; (km<sup>2</sup>)

$A_{mj}$  es el área del polígono generado a partir del mapa histórico del año j; (km<sup>2</sup>)

$e_2$  es el error de mapeo de los polígonos generados en base a imágenes satelitales; (km<sup>2</sup>)

$A_i$  es el área al polígono generado a partir de imágenes satelitales correspondiente al año i; (km<sup>2</sup>)

$n$  es la cantidad de polígonos generados a partir de imágenes satelitales



Dado que se consideran errores independientes ( $e_2$  y  $e_1$ ), el error total de cartografía de cada polígono ( $e_t$ ) está dado por la raíz cuadrada de la sumatoria de los errores al cuadrado.

$$e_t = \sqrt{e_1^2 + e_2^2} \quad \text{ecuación 2}$$

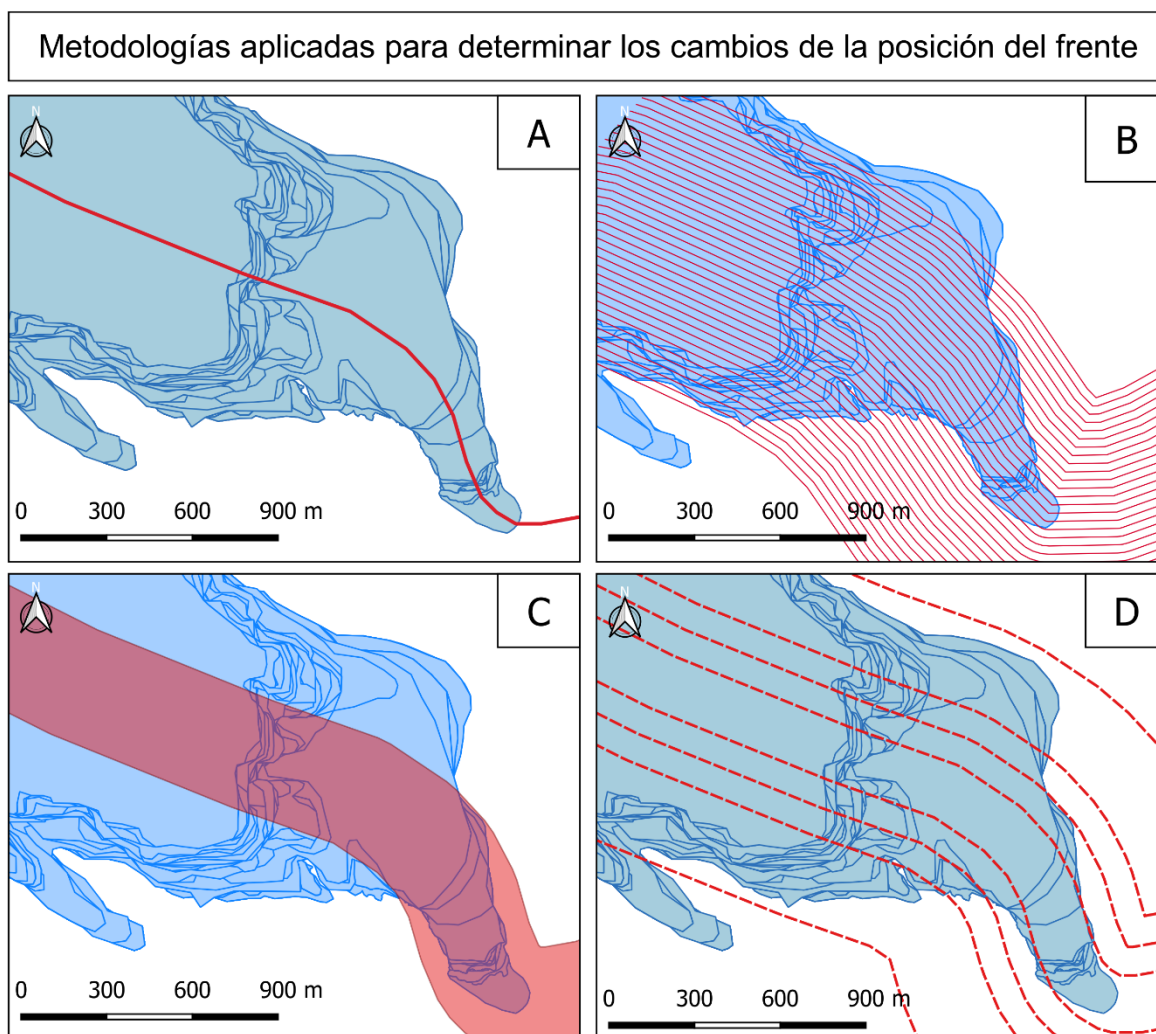
### **5.3. Análisis de las series de fluctuaciones del Alerce y su relación con las series de referencia de la región.**

#### **5.3.1. Cambios en el área**

Los cambios en el área de cada polígono se calcularon a partir de la calculadora de campos del software QGIS (3.18.2). El error asociado es igual a la raíz cuadrada de la sumatoria del error de cartografía de cada imagen al cuadrado, como se muestra en la ecuación 2.

#### **5.3.2. Cambios en la posición del frente**

Las variaciones de la posición del frente se calcularon en base a los cuatro métodos analizados por James Lea (2018) (ver figura 4): i) método de línea central de flujo; ii) método de caja curvilínea; iii) método de multilínea; iv) método de caja variable. A su vez, se analizaron las diferencias de los resultados y se determinó cuál es la más apropiada para el caso de estudio.



**Figura 4.** Metodologías aplicadas para determinar las fluctuaciones del frente del Alerce (1953-2020): línea de flujo central (A); multilíneas (B); caja curvilínea de 400m (C); y caja variable (D).

El método de *línea central de flujo* utiliza un vector (línea) de la línea central de flujo y los límites del frente (polígonos) para calcular la variación unidimensional de la posición del frente (ver figura 4A). Es el método más empleado ya que en un perfil transversal al glaciar, esa línea usualmente coincide con el máximo espesor de hielo y las máximas velocidades (James y Carrivick, 2016). El vector de línea de flujo central utilizado deriva del trabajo de Ruiz y colaboradores (2015), ajustado en base a los nuevos límites del glaciar. Para obtener las posiciones del frente de cada año se utilizó la función *Cortar* de QGIS (3.18.2) y se calculó la longitud de cada línea a partir de la calculadora de campos. Para la determinación del error se utilizó la ecuación 2, utilizando como parámetros de entrada el error de georreferenciación y la resolución espacial (Hall et al., 2003). Para el cálculo del error de la variación del frente, se consideró el error de cada imagen involucrada como parámetro de entrada para la ecuación 2.

El método de *multilínea* utiliza una serie de líneas paralelas (multilíneas) a la línea de flujo central para calcular la variación de la posición del frente (ver figura 4B). A diferencia del



método de *línea central de flujo*, el método multilínea permite captar las irregularidades a lo ancho del frente. El vector de multilíneas se generó aplicando la función *Arreglo de líneas desplazadas (paralelas)* de QGIS (3.18.2), utilizando como parámetro de entrada el vector de línea de flujo central, fijando una distancia de 30 m entre sí (resolución Landsat). Posteriormente se seleccionaron aquellas líneas que interceptaban todos los polígonos mapeados. En total se conservaron 36 líneas para el posterior análisis.

Para calcular la posición del frente se ejecutó la función *Intersección* de QGIS (3.18.2), entre el vector de multilínea y los polígonos del glaciar. Del vector resultante, se calculó la longitud de cada línea para cada año a través de calculadora de campos. Por último, se utilizó la función *Estadísticas por categoría* de QGIS (3.18.2), para obtener la posición media del frente para cada año. Para corroborar que el valor medio de las líneas sea representativo, se generaron histogramas para conocer la distribución de los datos. Para cuantificar el error del método se consideraron los errores de cartografía y la desviación estándar obtenida de las *Estadísticas por categoría* para cada año. Ambos errores se consideraron independientes entre sí. Para el cálculo del error de la variación del frente, se consideró el error de cada imagen involucrada como parámetro de entrada para la ecuación 2.

El método de *caja curvilínea* utiliza una caja de ancho fijo, generada a partir de la línea de flujo central, para calcular la variación de la posición media del frente (ver figura 4C). Al igual que el método *multilínea*, el método de *caja curvilínea* permite captar las irregularidades a lo ancho del frente en las fluctuaciones del glaciar. La caja curvilínea se generó aplicando la función *Buffer* de QGIS (3.18.2) al vector de línea central de flujo. Para evaluar la sensibilidad del método al parámetro *ancho de caja*, se hicieron pruebas con 6 cajas curvilíneas de diferentes amplitudes (200, 400, 600, 800, 1000 y 1200 m de ancho). La posición relativa del frente se obtiene realizando una simplificación de la caja en un rectángulo, donde la medida de uno de los lados (largo) representa la posición media del frente. Por lo tanto, la posición del frente se calcula realizando el cociente entre el área que ocupa el glaciar para cada año (dentro de los límites de la caja) y la anchura fija de la caja.

$$L_i = \frac{A_i}{b_n} \quad \text{ecuación 3}$$

Donde:

$L_i$ : posición relativa del frente para el año  $i$ ; (m)

$A_i$ : área que ocupa el frente dentro de la caja para el año  $i$ ; (m<sup>2</sup>)

$b_n$ : base fija de la caja; (m)

Para obtener los valores del área para cada año se utilizó la función *Intersección* de QGIS (3.18.2), utilizando como parámetros de entrada el vector de la caja curvilínea y los polígonos del glaciar. Al polígono resultante se le calculó el área a través de la calculadora de campos del mismo software. Al igual que el método de línea central de flujo, para el cálculo del error se utilizó la ecuación 2, utilizando como parámetros de entrada el error de georreferenciación y la resolución espacial (Hall et al., 2003). Para el cálculo del error de la variación del frente, se consideró el error de cada imagen involucrada como parámetro de entrada para la ecuación 2.



Cabe aclarar que este método es ligeramente diferente al utilizado en Lea (2018) para aquellos casos donde el ancho de la caja excede el ancho del glaciar. Lea (2018), “cierra” la caja a partir de los límites del frente, en línea recta hacia los bordes. En cambio, en el método aplicado en este estudio, se considera el área que ocupa el frente y se simplifica a un rectángulo de área equivalente.

Finalmente, el método de *caja variable* es similar al método de caja curvilínea, solo que, en este caso el ancho de la caja varía de acuerdo a la amplitud del frente para cada año (ver figura 4D). La amplitud de la caja está determinada por la distancia que existe entre el nodo inicial y terminal de la línea del frente; por lo tanto, la caja se “ajusta” a medida que fluctúa el ancho del glaciar. Para este método se utilizó el software MaQiT (2018), que requiere como parámetros de entrada el vector de la línea central de flujo (línea) y el vector de las posiciones del frente (polilínea). A diferencia del resto de las metodologías, en este caso se utilizó un vector de línea que solo contiene información del frente del glaciar (no incluye los márgenes laterales), debido a los requerimientos del modelo (Lea, 2018). Al igual que el método de línea central de flujo y caja curvilínea, para el cálculo del error se utilizó la ecuación 2, utilizando como parámetros de entrada el error de georreferenciación y la resolución espacial (Hall et al., 2003). Para el cálculo del error de la variación del frente, se consideró el error de cada imagen involucrada como parámetro de entrada para la ecuación 2.

#### **5.4. Comparación con series de referencia**

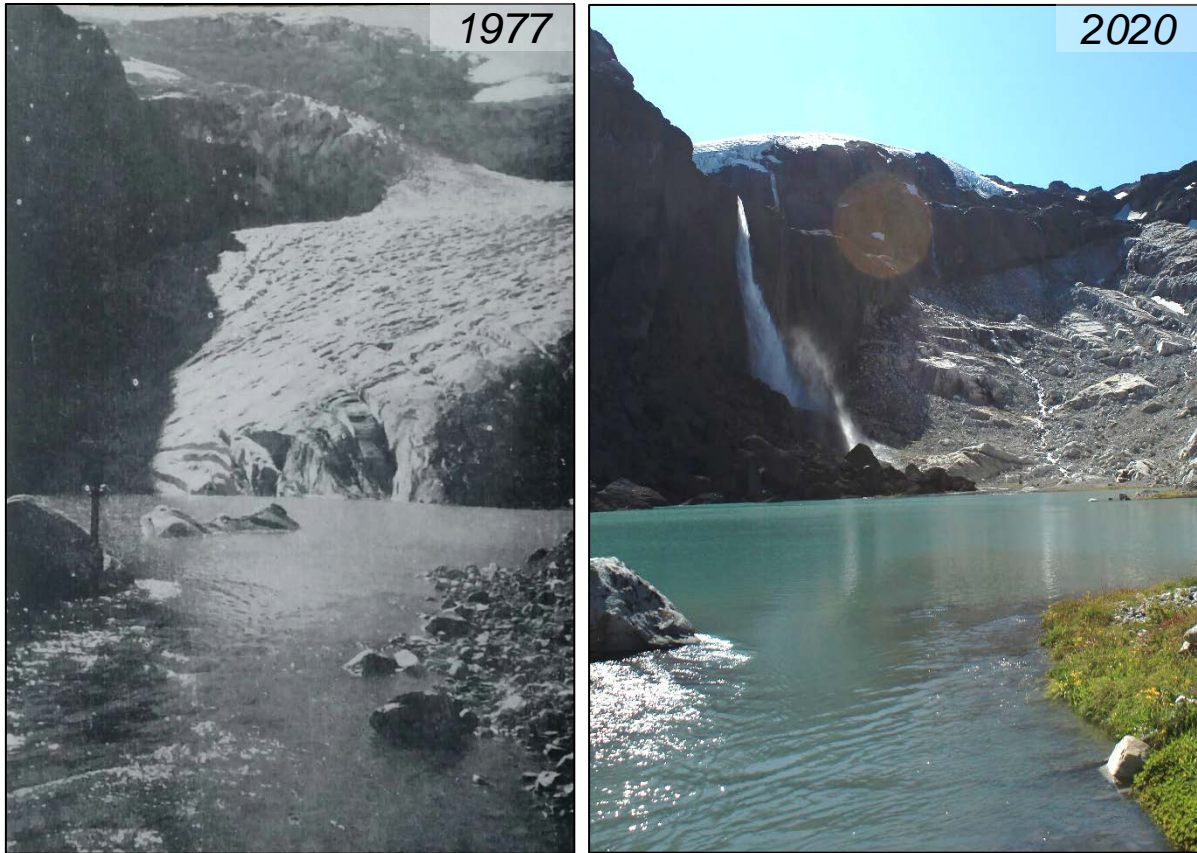
Se analizaron los cambios en la posición del frente del Alerce en comparación con las series del Esperanza Norte (Ruiz et al., 2012) y Frías (Leclercq et al., 2012). Por un lado, se evaluaron las variaciones del frente normalizadas a la variación total acumulada, con el fin de identificar cambios de tendencia con mayor claridad, y por otro, las variaciones acumuladas, para conocer la magnitud del cambio. Dado que las series del glaciar Frías y Esperanza Norte no cuentan con datos para el inicio (1953) ni el fin (2020) de la ventana temporal, se realizó una interpolación utilizando la tendencia lineal observada en los dos últimos datos más cercanos a cada fecha. A través de los patrones observados, se determinó si el Alerce presenta un comportamiento similar a las series de los glaciares Frías y Esperanza Norte, ambos situados en los Andes del Norte de Patagonia.

### **6. RESULTADOS**

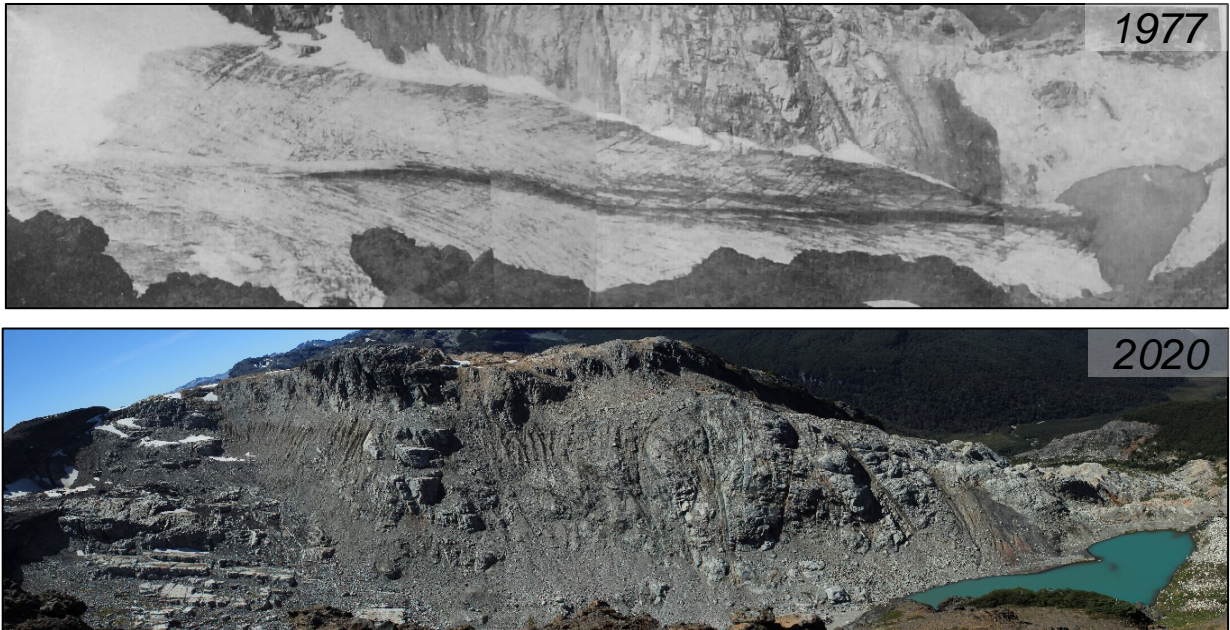
#### **6.1. Puesta en valor de los documentos históricos sobre el glaciar Alerce**

En primera instancia, se replicaron fotografías históricas del frente del glaciar publicadas en Rabassa y colaboradores (1978). En la figura 5, se observa la comparación del frente del Alerce para el año 1977 y la actualidad (2020), tomadas desde la naciente del río Alerce. Es posible apreciar cómo el frente pasa de recorrer el área del valle formando una lengua espesa de hielo (1977), a ubicarse en el filo del acantilado con un espesor considerablemente menor (2020). Desde una perspectiva lateral (ver figura 6) se observa con mayor claridad la pérdida de hielo, donde la lengua del glaciar desaparece completamente del cuadro de la fotografía.



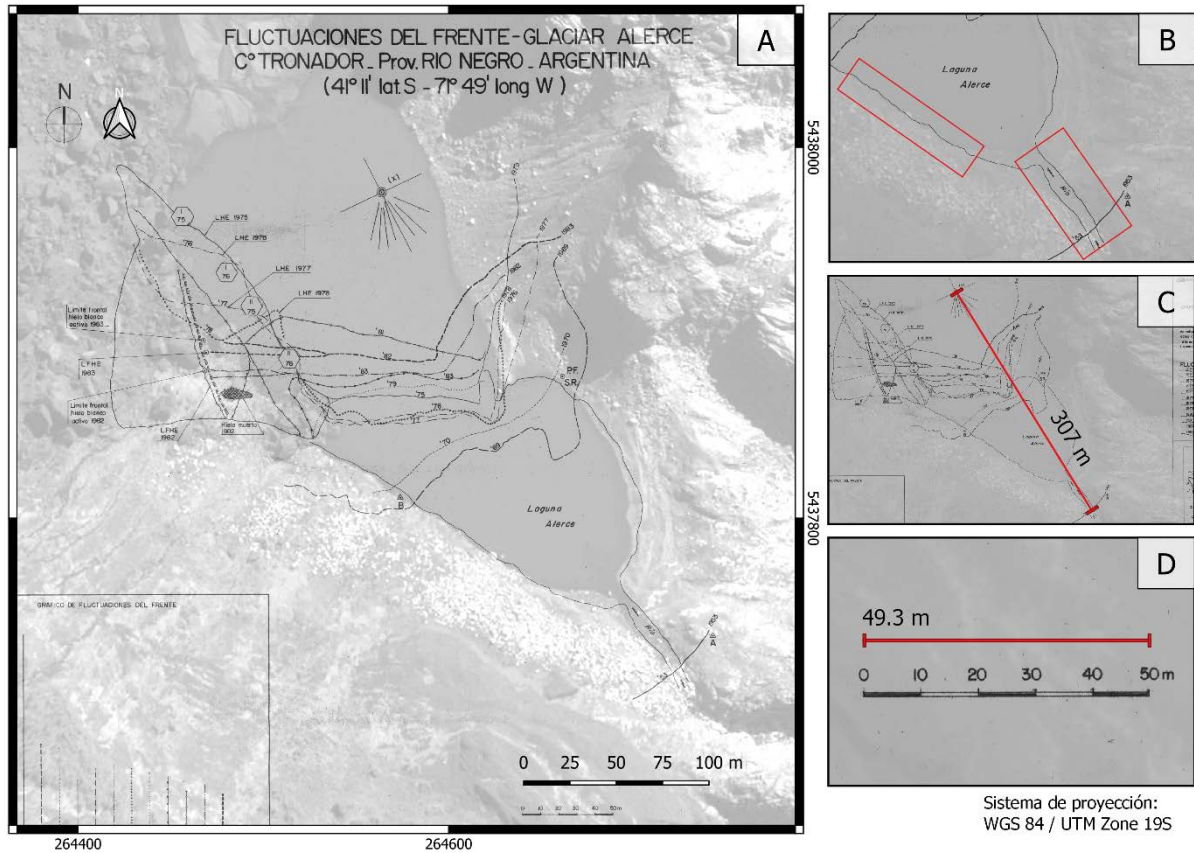


**Figura 5.** Fotografías del frente del Alerce desde la perspectiva del lago homónimo. Fotografías: S. Rubulis (1977) y J.C. Ghilardi Truffa (2020).



**Figura 6.** Fotografías del frente del Alerce desde la perspectiva del margen sur. Fotografías: S. Rubulis (1977) y J.C. Ghilardi Truffa (2020). Fuente: elaboración propia

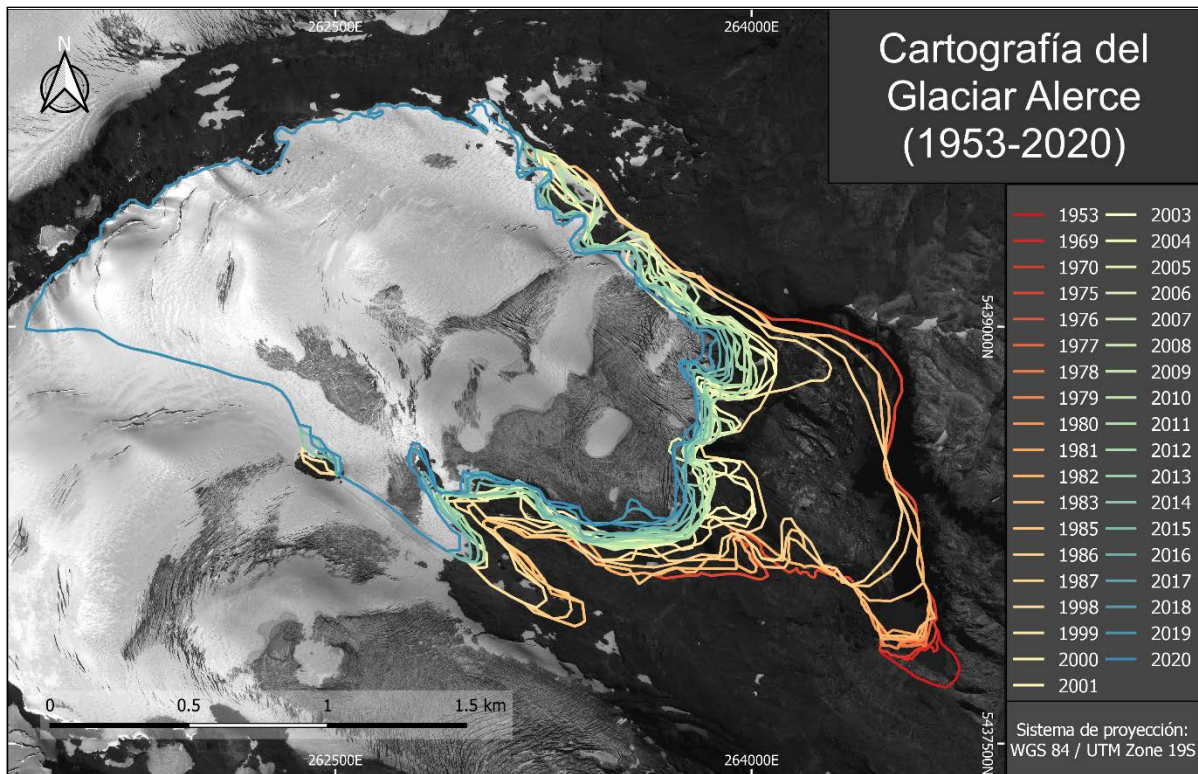
El mapa histórico de las fluctuaciones del frente (ver figura 7A) se georreferenció con un error residual medio de 21 m. A pesar de la limitada cantidad de puntos de control ( $n = 20$ ), se obtuvo un buen ajuste entre los bordes del lago y río mapeados (ver figura 7B). Según la información disponible en el mapa, la posición del frente para 1953 se encontraba a una distancia  $\sim 305$  m respecto al *punto de referencia*, mientras que la distancia medida en el mapa digitalizado fue de 307 m (ver figura 7C). Por último, la diferencia entre la escala del mapa y la escala del mapa georreferenciado fue de 0.7 m (ver figura 7D).



**Figura 7.** Mapa histórico de las fluctuaciones del frente del glaciar Alerce georreferenciado (A). El fondo de los mapas corresponde a una imagen Pléiades (2019). En las figuras laterales se esquematizan los criterios de evaluación que se aplicaron al resultado de la georreferenciación: diferencia entre los márgenes del río y del lago (B); distancia entre punto de referencia y frente de 1953 (C); y la diferencia entre la escala del mapa (D).

## 6.2. Cartografía de detalle del glaciar Alerce para el período 1953-2020

A partir de las imágenes históricas relevadas se generaron 37 vectores (polígonos) del glaciar Alerce que contienen información detallada sobre la extensión del glaciar (ver figura 8). El error estimado fue de 0.07 km<sup>2</sup> y de 0.09 km<sup>2</sup>, para las interpretaciones realizadas en base a imágenes satelitales y al mapa histórico, respectivamente.

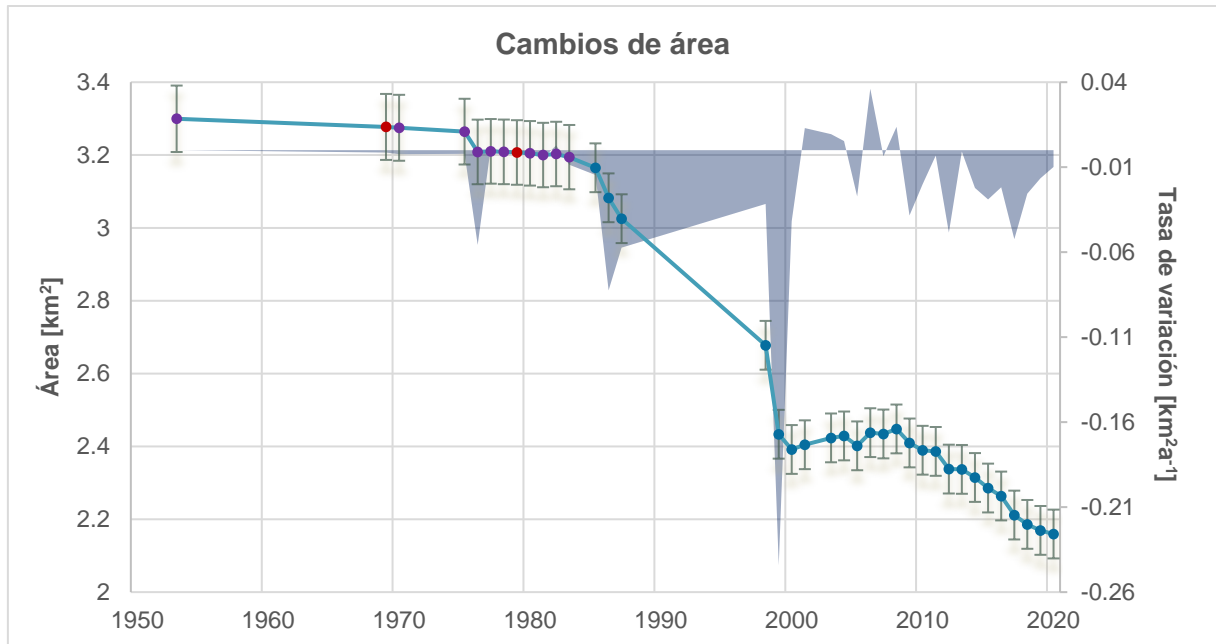


**Figura 8.** Cartografía de detalle del glaciar Alerce para el período 1953-2020. La imagen de fondo corresponde a una imagen Pléiades (2019).

### 6.3. Análisis de las fluctuaciones del Alerce y su relación con las series de referencia de la región.

#### 6.3.1. Cambios de área

Desde 1953 hasta la actualidad (2020), se observa una pérdida de  $1.1 \pm 0.1 \text{ km}^2$  de área glaciar, a una tasa promedio de  $-0.017 \pm 0.001 \text{ km}^2\text{a}^{-1}$  (ver figura 9). La evolución del cambio de área a lo largo del tiempo no ha sido homogénea. A partir de las tasas de cambio se pueden distinguir cinco subperíodos: i) 1953-1976; ii) 1977-1983; iii) 1984-1998; iv) 1999-2008; v) 2009-2020.



**Figura 9.** Cambios en el área del glaciar Alerce. Las barras representan el nivel de error. El color de los marcadores indica la fuente de información utilizada en la digitalización; según mapa histórico (violeta), foto aérea (rojo) o imagen satelital (azul).

Durante el primer período considerado (1953-1976) el área no cambió sustancialmente; pasó de tener 3.30 a  $3.28 \pm 0.13$  km<sup>2</sup>, a una tasa de variación ligeramente negativa. A mediados de los 70, comienza un breve período (II) donde se alcanza la mayor estabilidad en toda la serie ( $0.02 \pm 0.13$  km<sup>2</sup>) manteniendo una tasa levemente positiva. Sin embargo, las variaciones se encuentran dentro del margen de error, por lo tanto, no se consideran cambios significativos. Cabe aclarar que las mediciones de cambios de área de estos períodos (I y II) se ven afectadas por la falta de información de los márgenes del glaciar. A su vez, la resolución temporal de los datos es relativamente baja, particularmente, para la década de los 50-60 solo se cuenta con un dato del área.

En el tercer período (III), se observa una tasa de pérdida 3 veces mayor al promedio, alcanzando una variación de área de  $-0.76 \pm 0.09$  km<sup>2</sup>. Si bien en este período se alcanza la máxima tasa de pérdida anual entre 1998 y 1999, el dato no es confiable debido a que la mejor imagen Landsat disponible para 1998 presenta un exceso de nieve; lo cual podría generar una sobreestimación de la variación entre esos años.

A partir de 1999 comienza un período de estabilidad (IV), donde se observa un leve aumento dentro del margen de error ( $0.015 \pm 0.09$  km<sup>2</sup>). Entre el 2000-2004 se observa un incremento sostenido de la superficie, seguido de una alternancia pérdida y ganancia hasta el 2009. En la última década (V) se observa una disminución del área sostenida, donde el glaciar pasa de tener 2.41 a  $2.16 \pm 0.09$  km<sup>2</sup>. En esta última etapa se observan años alternados de pérdida y estabilidad hasta el 2014, seguidos de una disminución de superficie sostenida a tasas relativamente altas hasta el 2017. Finalmente, durante los últimos 3 años la tasa de cambio comienza a disminuir, a pesar de que el glaciar continúa perdiendo superficie.

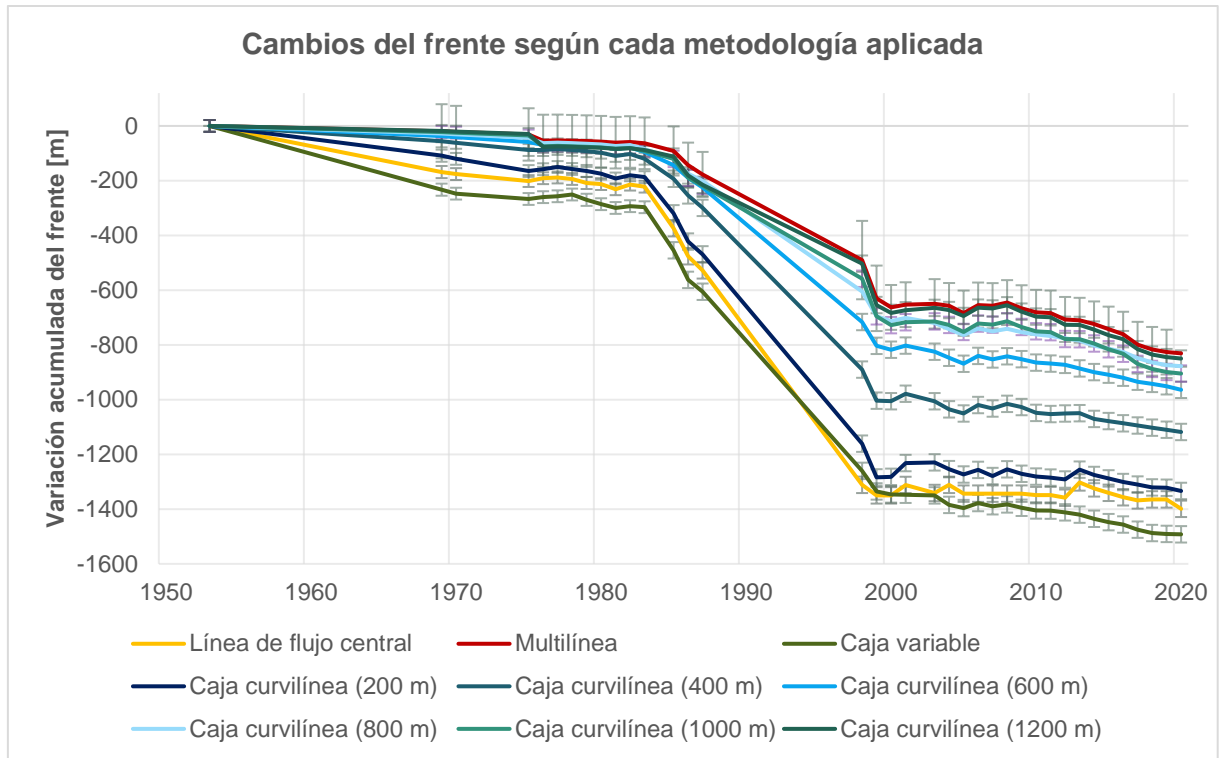
### 6.3.2. Cambios de la posición del frente



Se observan diferentes resultados dependiendo de que metodología se aplique (ver figura 10). La mayor diferencia se observa entre los métodos de línea de caja variable y multilínea, alcanzando una diferencia en la variación acumulada de 661 m. Si consideramos los resultados del método de caja variable, la tasa media de retroceso es aproximadamente el doble (1.8 veces mayor) que la obtenida mediante el método multilínea. Sin embargo, de acuerdo a la distribución de los datos obtenidos a partir del método multilínea, el promedio de la posición del frente no es un valor representativo en muchos de los casos analizados, dado que cerca de la mitad de los años (14) presentan histogramas bimodales (ver figura 18 en Anexo). Por lo tanto, la confianza en los resultados según este método es baja.

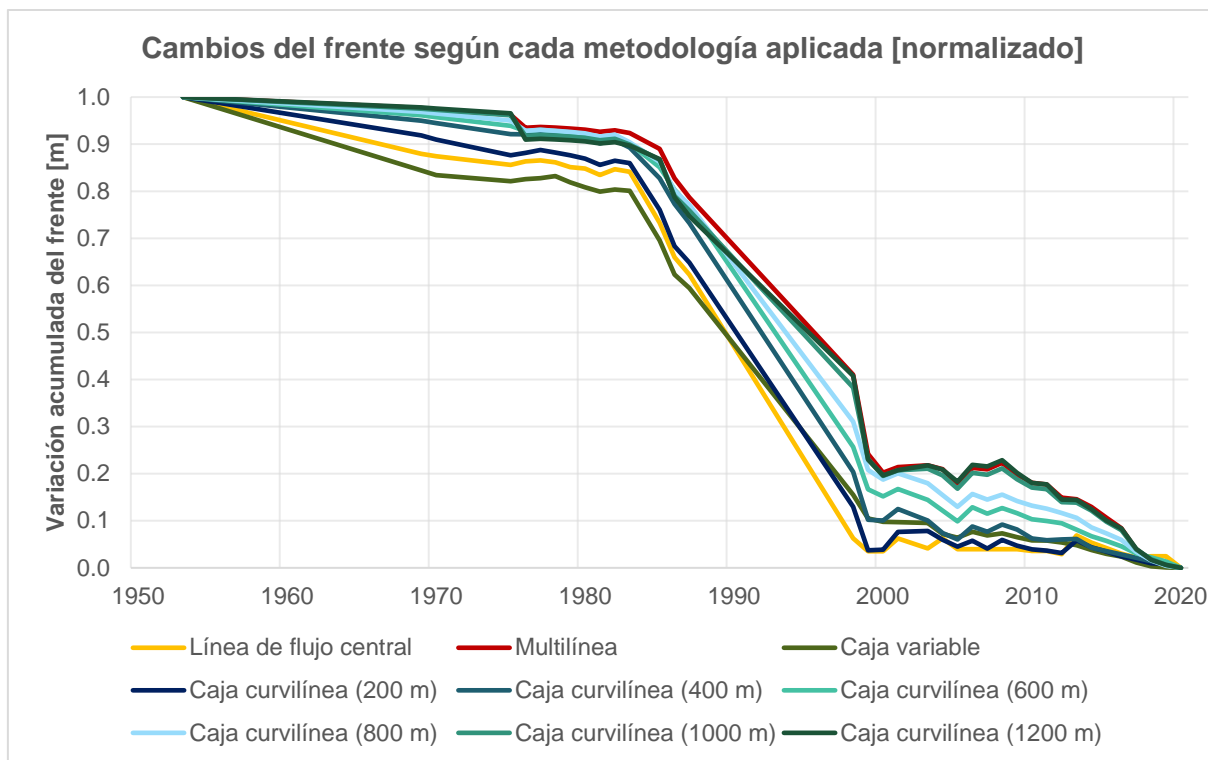
Mediante el método de línea central de flujo se obtiene un patrón de variación similar al del método de caja variable, al menos hasta la década de los 00. Para las últimas dos décadas, el patrón de variación difiere entre ambas metodologías; el método de línea central de flujo registra años relativamente estables, con avances marcados para algunos años (p.ej. 2013 o 2019), mientras que el método de caja variable muestra una curva más suave, con avances de menores magnitudes, que tiende a decrecer de manera sostenida durante la última década. Inclusive existen años donde se observan variaciones opuestas (p.ej. 2004 y 2013). Estas diferencias se deben a la morfología de la lengua y a la topografía del terreno donde está ubicado el frente durante estos años.

Los resultados obtenidos mediante el método de caja curvilínea varían considerablemente de acuerdo al ancho de la caja que se establece. A medida que la caja es más angosta (200 m), el resultado se aproxima a lo observado por el método de línea de flujo central, dado que la caja cubre una porción relativamente acotada de la lengua. En cambio, a medida que la caja es más ancha (600 m en adelante), el resultado se aproxima al método de multilínea, debido a que abarca una mayor superficie del frente. Sin embargo, la confianza en los resultados obtenidos mediante esta metodología es baja, debido que el método tiende a subestimar la variación para aquellos años donde el ancho de caja excede el ancho del frente del glaciar. A medida que el ancho de caja aumenta, se acumulan más años donde el ancho de caja supera el ancho del glaciar y, por lo tanto, se acumula una variación subestimada.



**Figura 10.** Cambios en la posición del frente del glaciar Alerce según cada metodología aplicada. Las barras representan el nivel de error.

A pesar de la variabilidad en los valores obtenidos, el patrón de cambio no varía sustancialmente entre las diferentes metodologías, al menos hasta fines de la década del 90' (ver figura 11). Las metodologías que consideran una parte más reducida del frente, pierden sensibilidad al cambio para las últimas dos décadas. En cambio, para aquellas que abarcan mayor amplitud, se observa un patrón similar al de los cambios de área.



**Figura 11.** Cambios en la posición del frente del Alerce (normalizados) según cada metodología.

Debido a que el método de caja variable contempla la variabilidad en el ancho del frente a lo largo período analizado, los cambios en la posición del frente se analizan en función de los resultados obtenidos a través de esta metodología. A su vez, presenta una variación acumulada similar al método de línea central de flujo, sin perder sensibilidad para las últimas dos décadas. Por lo tanto, es el método de mayor confianza.

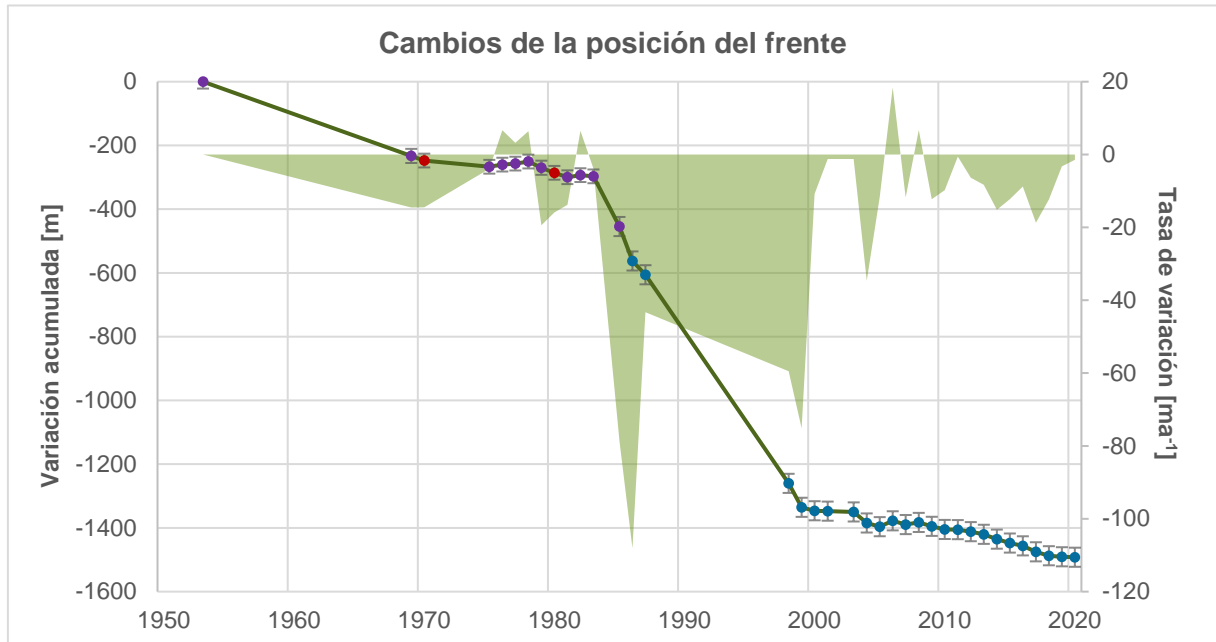
En función de los resultados derivados del método de caja variable, la retracción del frente fue de  $1492 \pm 40$  m para los últimos 70 años, a un ritmo de pérdida medio de  $22.2 \pm 0.5$   $\text{ma}^{-1}$ . Al igual que en la sección de cambios de área, el análisis se aborda a partir de la distinción de cinco subperíodos: i) 1953-1976; ii) 1977-1983; iii) 1984-1998; iv) 1999-2008; v) 2009-2020.

Durante el primer período considerado (1953-1976) el glaciar alcanza un retroceso acumulado de  $260 \pm 30$  m, a una tasa de  $-11.3 \pm 0.5$   $\text{ma}^{-1}$  (50% respecto al promedio). En contraposición a los cambios observados en las variaciones de área, en el segundo período (1977-1983) se registra un retroceso del glaciar; sin embargo, la variación acumulada representa el 2% del total durante los últimos 70 años. Particularmente, desde 1976 a 1979 se observa un avance del frente, manteniendo una tasa ligeramente positiva del orden de los  $5 \pm 0.5$   $\text{ma}^{-1}$ .

En el tercer período (1984-1998), se observa una tasa de retroceso 2.6 veces mayor al promedio, alcanzando valores de  $-57.6 \pm 0.5$   $\text{ma}^{-1}$ . A su vez, la retracción del frente para este período fue de  $-806 \pm 42$  m, lo que representa el 54% del retroceso acumulado para los últimos 70 años. A partir de 1999 (IV), comienza un período de avances y retrocesos alternados, donde se observa una variación de  $-47 \pm 42$  m, a una tasa media similar a la registrada en el segundo período. Finalmente, en la última década (2009-2020) se observa una retracción



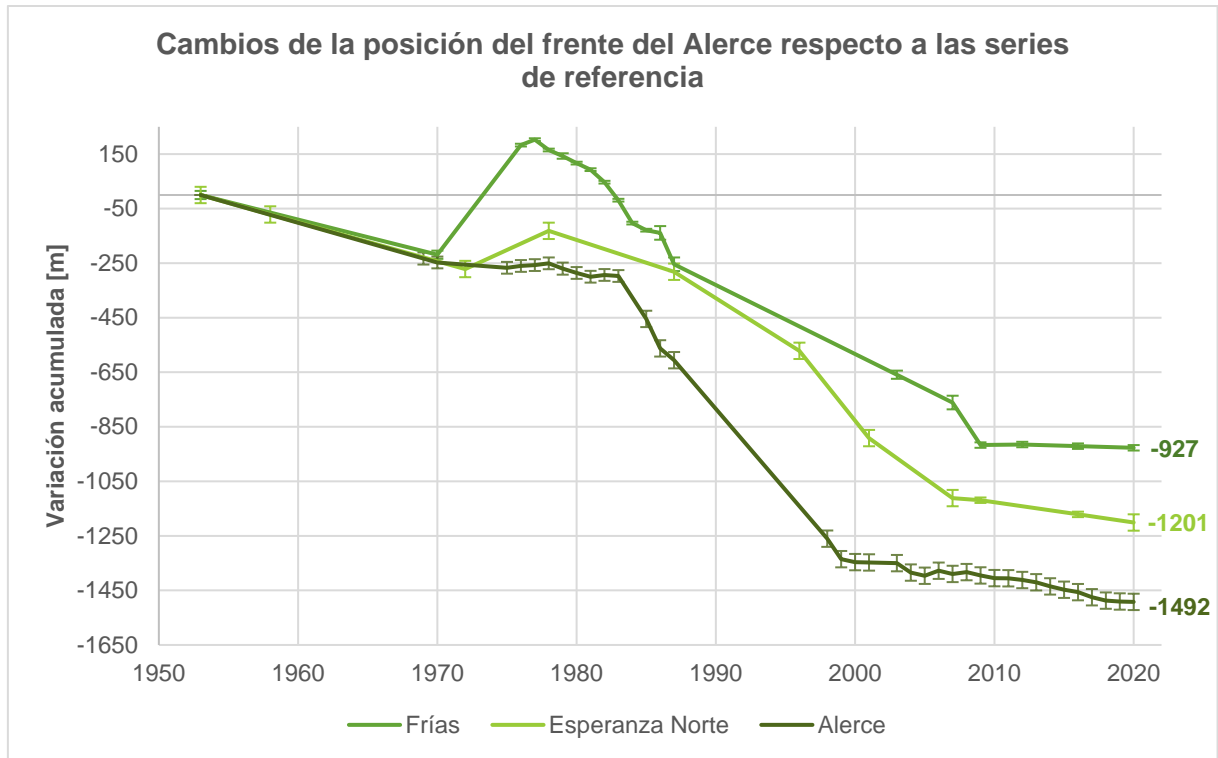
sostenida del frente de  $97 \pm 42$  m. A su vez, al igual que en el tercer período, no se registra ningún año de avance para la última década.



**Figura 12.** Cambios en la posición del frente del glaciar Alerce. La serie de variación del frente se construye en base al método de caja variable. El color de los marcadores indica la fuente de información utilizada en la digitalización; según mapa histórico (violeta), foto aérea (rojo) o imagen satelital (azul). Las barras representan el nivel de error.

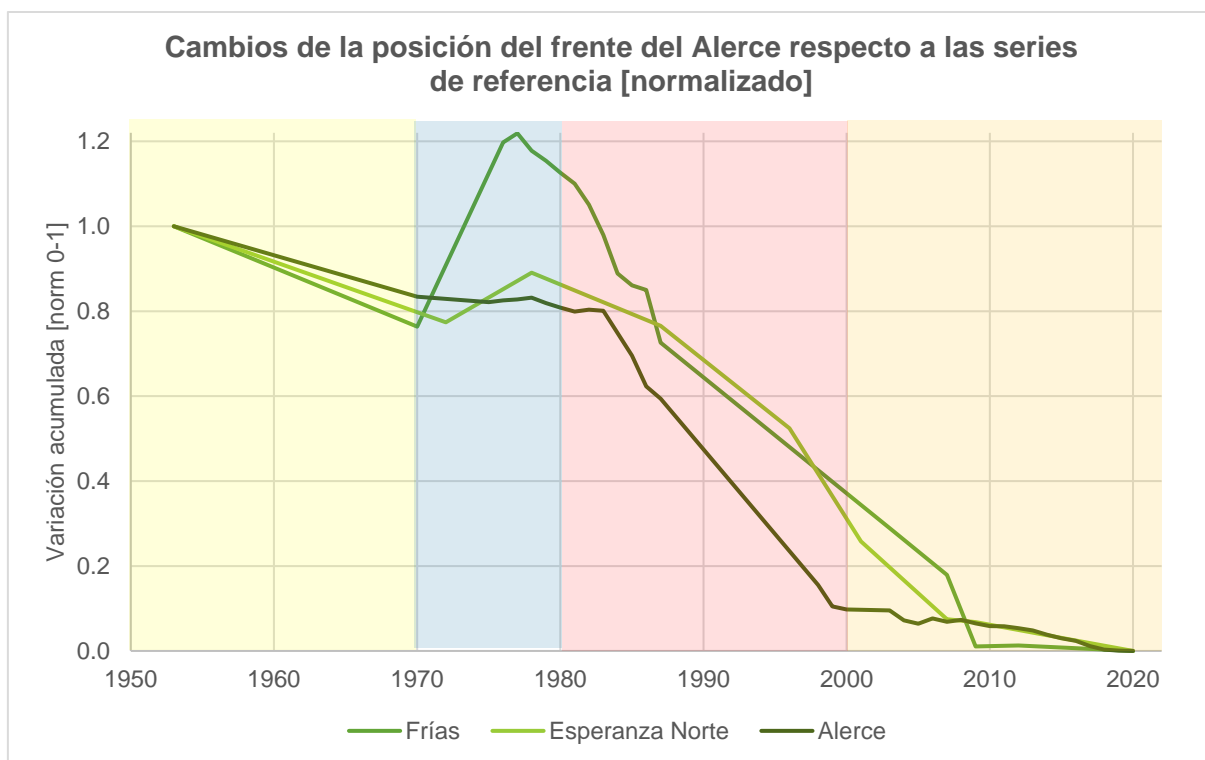
#### 6.4. Comparación con glaciares de la región

Durante las décadas de los 50 y 60 todas las series muestran un retroceso del frente; de hecho, la variación acumulada hasta 1970 es prácticamente la misma en valores absolutos (ver figura 13). En los 70, el Frías y el Esperanza Norte experimentan un período de avance, alcanzando valores acumulados de  $402 \pm 15$  m y  $140 \pm 30$  m respectivamente; mientras que el Alerce no evidencia un avance destacable, sino que disminuye ligeramente su tasa de retroceso. A principios de la década de los 80 comienza una etapa de fuerte retroceso, donde todas las series alcanzan sus mayores tasas de retroceso. El glaciar Frías y Esperanza Norte registran una retracción más temprana que el Alerce. Sin embargo, al entrar en la década de los 00 el Alerce disminuye su ritmo de pérdida y comienza una etapa relativamente estable, mientras que el Frías y el Esperanza Norte tardan casi diez años más en disminuir su tasa de retroceso.



**Figura 13.** Cambios en la posición del frente de los glaciares Esperanza Norte, Frías y Alerce. Datos: Leclercq et al., 2012 y Ruiz et al., 2012.

Los cambios de la posición del frente del glaciar Alerce presentan un patrón general similar a las series de los dos glaciares con mejores registros de la Patagonia Norte Argentina (ver figura 14). En todas las series es posible distinguir una primera etapa de retroceso leve (hasta fines de los 60), seguido de un período de avance o estabilidad (en los 70), luego un fuerte retroceso (en los 80-90) y finalmente, un período de retracción relativamente bajo (00-10 en adelante).



**Figura 14.** Cambios en la posición del frente (normalizados) del glaciar Esperanza Norte, Frías y Alerce. Datos: Leclercq et al., 2012 y Ruiz et al., 2012.

## 7. DISCUSIÓN

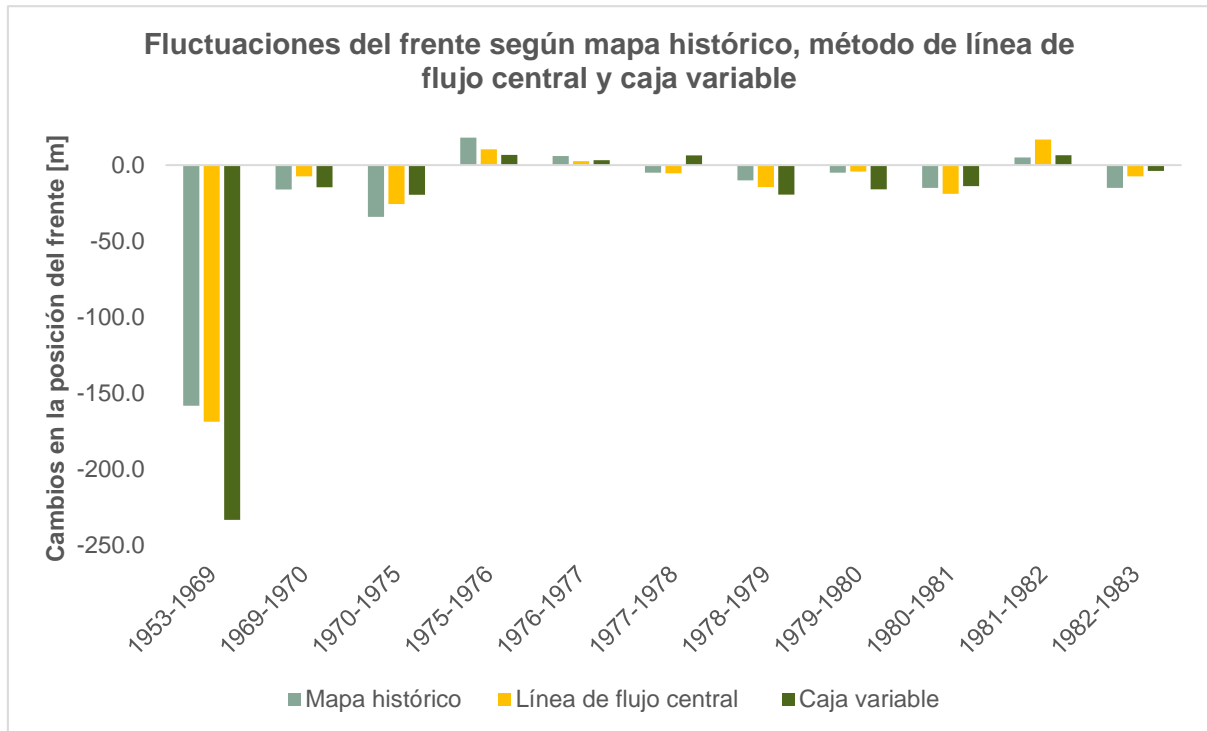
### 7.1. Documentación histórica del glaciar Alerce

Los registros históricos resultan una valiosa fuente de información para la reconstrucción del ambiente en el pasado (Colgan et al., 2016; Nussbaumer et al., 2011; Pérez y Cañadas, 2014). De las fotografías históricas y el mapa relevado, es posible obtener información de la extensión y cambios de posición del frente, para un período de tiempo en el cual existen escasos registros; además cuentan con información de rasgos que permiten inferir patrones de dinámica, espesor, porcentaje de cobertura de detritos, entre otros. A su vez, las fotografías del frente son excelentes recursos visuales para generar impacto en actividades de comunicación y divulgación. Lo cual cobra mayor relevancia en el caso del glaciar Alerce, dado que se encuentra dentro del Parque Nacional Nahuel Huapi, donde además de ser un atractivo turístico, resulta una potencial referencia para actividades de educación ambiental.

Dentro de un territorio que aún mantiene una identidad cultural y ambiental relativamente prístina, y una gran afluencia turística (SIB, 2019), es clave generar espacios de divulgación vinculados al cambio climático, como senderos interpretativos o cartelera, en torno a la información disponible sobre el Alerce y los glaciares del Monte Tronador.

Las fluctuaciones del frente publicadas en el mapa histórico coinciden mejor con los resultados obtenidos a través del método de línea de flujo central (ver figura 15), lo cual es esperable, dado que las metodologías para determinar la posición del frente son similares. En el caso del mapa histórico, la posición del frente está dada por la distancia en línea recta que existe entre el límite del frente y un punto de referencia arbitrario. Por lo tanto, las diferencias están

asociadas al punto donde interseca cada línea con el frente, o bien, por una diferencia entre la longitud de una línea curva (línea de flujo central) respecto a una línea recta. A su vez, el hecho de que las variaciones del frente entre ambas metodologías sean similares puede entenderse como un buen resultado en la georreferenciación del mapa. El método de caja variable también presenta valores similares a los datos del mapa histórico, a pesar de que existan períodos puntuales donde las fluctuaciones difieren considerablemente (p.ej. 1953-1969).

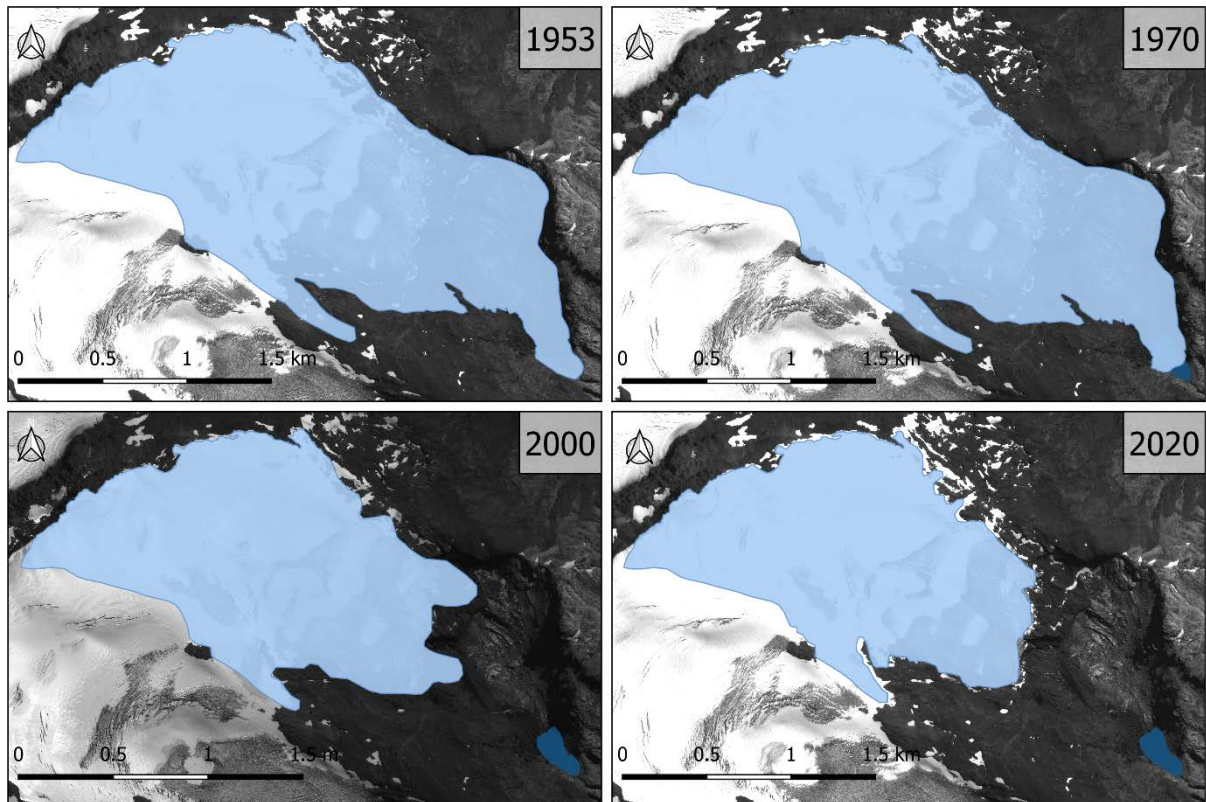


**Figura 15.** Comparación de los cambios en la posición del frente según los registros del mapa histórico y las variaciones obtenidas según los métodos de línea de flujo central y caja variable.

La información del mapa histórico digitalizada representa un recurso importante para mejorar la comprensión de la historia reciente del glaciar Alerce. El hecho de que la información esté disponible en formato digital, abre las puertas a estudios de mayor alcance a través del uso de sistemas de información geográfica. A su vez, aporta datos de morfología glaciar para un período de tiempo en el cual no se cuenta con información satelital.

## 7.2. Metodologías aplicadas para determinar la posición del frente

Las características topográficas del terreno generan una gran dificultad a la hora de determinar la posición precisa del frente, en particular para los años anteriores a la década de los 80. La heterogeneidad en la pendiente del lecho hace que los márgenes del frente fluctúen de forma irregular, pudiendo variar más o menos en zonas de mayor o menor cambio de pendiente, respectivamente. En particular, en la década de los 00, los márgenes laterales del frente alcanzan una diferencia hasta de ~250 m respecto a la zona central (ver figura 16).



**Figura 16.** Variaciones en el ancho del frente del Alerce. En 1953 el ancho era de ~100m y aún no existía el lago proglaciar; en 1970 la amplitud es de ~250m y el frente está en contacto con el lago; para el 2000 el glaciar ya perdió completamente su lengua y el ancho del frente es de ~880m, evidenciando una marcada irregularidad; actualmente (2020) el ancho es de ~785m y presenta menos irregularidad entre los márgenes y la zona central.

A grandes rasgos, la amplitud del frente toma dos órdenes de magnitud diferentes para el período analizado (ver figura 16). Hasta el fin de la década de los 80, el glaciar desciende por el valle y la amplitud de la lengua es del orden de los ~200 m. Sin embargo, para los años posteriores, la amplitud del frente fluctúa entre los 800 m y 900 m, siendo hasta 4 veces mayor. Esta diferencia explica la variabilidad en los resultados de las metodologías aplicadas, dado que esencialmente varían en la amplitud del margen que considera cada una.

El método de línea central de flujo puede resultar una buena aproximación para determinar la variación total a gran escala (Lea et al., 2014); sin embargo, los resultados no son representativos de aquellos casos donde el frente fluctúa de forma irregular. En el caso del glaciar Alerce, a partir de los 00, la parte central del frente atraviesa una zona con un cambio de pendiente mucho mayor que las zonas de los márgenes laterales, esto provoca que las fluctuaciones del frente en la parte central tengan una variación menor que los márgenes; por lo tanto, el método de línea de flujo central, al intersectar un punto del centro, no es sensible a las variaciones del frente.

El método de caja curvilínea es altamente sensible al ancho de caja utilizado. A medida que el ancho de caja aumenta los resultados se asemejan más a los patrones observados en el cambio de área; sin embargo, también se acumula una subestimación de las variaciones del frente. Por el contrario, a medida que disminuye el ancho de caja, los resultados se aproximan



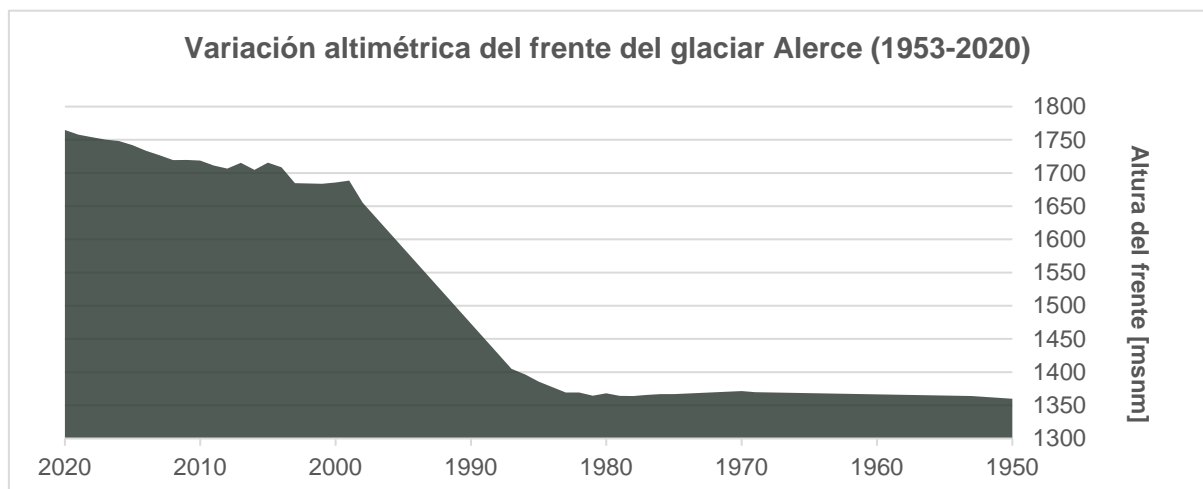
a los valores obtenidos mediante el método de línea central de flujo, y se pierde sensibilidad de cambio para las últimas décadas. Por lo tanto, no es una buena alternativa para el caso de estudio.

Mediante el método multilínea se obtienen resultados similares a los obtenidos mediante el método de caja curvilínea, considerando un ancho de caja de 1200m; por lo cual, es sensible a las variaciones de las últimas dos décadas. Sin embargo, la distribución de los datos, la irregularidad de los márgenes y los cambios de amplitud del frente, hacen de este método la alternativa menos indicada.

En el caso del Alerce, es probable que el cambio en la posición del frente que más se aproxima a la realidad sea el obtenido a través del método de caja variable. Esto se debe principalmente a que es el único método que contempla en su cálculo la variabilidad en el ancho del frente para el período estudiado. A gran escala refleja un patrón similar al obtenido por el método de línea central de flujo, con la diferencia de que el método de caja variable es sensible a las variaciones para las últimas dos décadas. A su vez, los patrones de cambio son similares a los observados en el cambio de área, a pesar de que existen diferencias para la década de los 70.

### 7.3. Análisis de las fluctuaciones del Alerce en comparación con las series de referencia para la región

Los cambios de área y la fluctuación frontal del glaciar Alerce evidencian un marcado retroceso durante los últimos 70 años. Desde 1953 hasta la actualidad (2020) el glaciar perdió el 35% de su superficie y alcanzó un retroceso del 67% de su largo total. Esta pérdida del glaciar es más acentuada durante la década de los 80 y 90, cuando el frente atraviesa una zona de alta pendiente (ver figura 17). Durante estas dos décadas el frente del glaciar ascendió ~320 msnm (ver figura 17), lo cual representa el 79% de variación altitudinal total. A su vez, los cambios de área y de largo presentan patrones similares a lo largo del período analizado (ver figuras 9 y 12).



**Figura 17.** Variación altimétrica del frente del glaciar Alerce, para el período 1953-2020. Datos: generados a partir de una transecta del modelo digital de elevación SRTM-4.

Durante las últimas dos décadas los cambios coinciden con las tendencias observadas por Dussailant y colaboradores (2019) en el balance de masa para los glaciares de Patagonia



Norte. Siendo la década del 00 un período relativamente estable (inclusive con una ganancia en superficie), interrumpido en el 2008-2009 por un fuerte cambio en la tendencia, que se ha sostenido hasta la actualidad. En particular, el retroceso observado durante la última década, coincide temporalmente con una marcada disminución de los aportes de precipitación provenientes del Pacífico (Rivera et al., 2017).

Durante las décadas de los 50 y 60, El Frías (5.29 km<sup>2</sup>) y el Esperanza Norte (10.31 km<sup>2</sup>) evidencian un patrón de cambio similar al del Alerce (2.36 km<sup>2</sup>) en las fluctuaciones del frente. Inclusive la magnitud de cambio en todas las series es del orden del ~20%, respecto a la variación total acumulada. De acuerdo a las observaciones de Rabassa y colaboradores (1978), es probable que la magnitud de cambio del Alerce sea representativa para estas décadas; sin embargo, según los datos del mapa histórico la variación para el período 1953-1969 se encuentra sobreestimada (ver figura 15).

A partir de los 70, los glaciares Frías y Esperanza Norte muestran un marcado avance, que coincide con un período de aumento de las precipitaciones y disminución de la temperatura en la región (Ruiz et al., 2012, 2017); mientras que el glaciar Alerce no evidencia un avance considerable, sino que registra un período de estabilidad, con avances y retrocesos que se encuentran dentro del margen de error. Estos resultados coinciden con los registros del mapa histórico. En particular, se observa una pequeña ventana de avance entre 1976 y 1979, en base a la cual Rabassa y colaboradores (1978) sugirieron que, de mantenerse la tendencia observada, el lago proglaciar desaparecería completamente por el avance del glaciar.

A diferencia de los glaciares Frías y Esperanza Norte, hasta mediados de la década de los 80, el frente del glaciar Alerce se encontraba en contacto con un lago proglaciar (ver figura 5 y 16), manteniendo una dinámica de *calving* (Rabassa et al., 1978). Por lo tanto, es probable que el avance regional de los 70, no se refleje en el Alerce dada la influencia que ejercía el cuerpo de agua sobre el glaciar. Debido a la velocidad en la cual ocurrieron estos cambios, es probable que el glaciar no haya tenido tiempo para formar un “banco de sedimentos” lo suficientemente extenso, como para permitir un avance en magnitudes similares a las observadas en los otros glaciares. Por lo tanto, mientras el glaciar estuvo en contacto con el lago homónimo, las fluctuaciones del frente probablemente estuvieron desacopladas a los cambios del clima para la región.

Luego del avance o estabilidad (en el caso del Alerce) de los 70, se observa un marcado retroceso en la década de los 80 y 90, donde se registra una retracción acumulada del orden de los ~700-800 m en todas las series; lo que representa más del 50% del retroceso acumulado para los últimos 70 años. Posiblemente, estos cambios estén vinculados un período de altas temperaturas y disminución de la precipitación (Bown González, 2004; Dussaillant et al., 2019; Leclercq et al., 2012; Masiokas et al., 2007; Paul y Mölg, 2014; A. Rivera et al., 2005; Ruiz et al., 2017).

A partir de los 00 el glaciar Alerce comienza a “estabilizarse”, mientras que los glaciares Frías y Esperanza Norte demoran casi una década en disminuir su tasa de retroceso. Esto último podría estar asociado a una menor sensibilidad a los cambios del clima, vinculada al tamaño que tienen estos glaciares.

A pesar de que existan diferencias en el tiempo de respuesta, las fluctuaciones del frente del Alerce responden de manera similar las series de los glaciares Frías y Esperanza Norte (ver figura 14). Inclusive a escala decadal es posible identificar un patrón de cambio común entre



las series. No obstante, a escalas temporales menores (anuales o interanuales) las series presentan comportamientos disímiles.

Debido a la dificultad para sostener programas de investigación a largo plazo, hasta la fecha existen tan solo tres glaciares en los Andes del Sur (Argentina y Chile) con series relativamente extensas de observaciones continuas (Buttstädt et al., 2009; Farías-Barahona et al., 2019; Kinnard et al., 2020), y ninguna de ellas se encuentra en los Andes de Patagonia Norte. Los esfuerzos para sostener mediciones continuas sobre los glaciares de esta región se concentran en el Monte Tronador (Bown y Rivera, 2007; Masiokas et al., 2008; Ruiz et al., 2017; Zorzut et al., 2020) y recientemente enmarcadas en la Ley de Régimen de Presupuestos Mínimos para la Preservación de los Glaciares y del Ambiente Periglacial (Ley 26639). Por lo tanto, contar con un glaciar de referencia como el Alerce, que sea representativo de los cambios en la región, es una herramienta clave para el monitoreo del estado de la criósfera en los Andes del Norte de Patagonia y los Andes del Sur.

Si bien en este trabajo el análisis se limita a las fluctuaciones morfológicas del Alerce, la información generada puede ser utilizada en estudios que permitan profundizar aún más el conocimiento de los glaciares del Norte de Patagonia, contemplando un número mayor de variables.

## **8. CONCLUSIONES**

En el presente estudio se realizó la reconstrucción del largo y área del glaciar Alerce para los últimos 70 años. A través del análisis de las fluctuaciones del glaciar, se evidencia un patrón de cambio similar en relación con las series más extensas y detalladas hasta ahora en la región. Por lo cual, su ponderación como glaciar de referencia para los Andes de Patagonia Norte parece ser acertada.

Se logró poner en valor los documentos históricos del Alerce, a través de la digitalización del mapa histórico y la actualización de las fotografías históricas del frente. La información relevada representa un valioso recurso para conocer el pasado reciente del glaciar, dado que cuenta con datos morfológicos para un período de tiempo en donde existe un vacío de información (1950-1980). A su vez, queda disponible la comparación fotográfica del frente del glaciar, como una posible herramienta de educación ambiental.

A partir de la información digitalizada del mapa histórico, fotografías aéreas e imágenes satelitales, se generó la cartografía de detalle del glaciar para los últimos 70 años, alcanzando un buen nivel de resolución espacio-temporal. La información geoespacial generada será de utilidad para: i) mejorar la comprensión de cómo el cambio climático afecta al glaciar Alerce; ii) calibrar y validar modelos numéricos para conocer el impacto futuro del cambio climático; iii) tomar conciencia del cambio climático y sus consecuencias; iv) estudios que contemplen un mayor número de variables, que permitan conocer cuáles las implicancias socioambientales vinculadas al cambio climático en la región.

Para cuantificar las variaciones del frente del glaciar se evaluaron cuatro metodologías basadas en el trabajo de Lea (2018), y se obtuvo una amplia variabilidad en los resultados. Sin embargo, se concluyó que el método de caja variable es el que mejor representa las variaciones del glaciar Alerce, en comparación con el resto de las metodologías aplicadas.

Los cambios en el área y la posición del frente evidencian un marcado retroceso durante los últimos 70 años. El glaciar perdió un 35% de su superficie y alcanzó un retroceso acumulado





de  $1492 \pm 40$  m. A su vez, fue posible distinguir diferentes patrones de cambio a lo largo del tiempo. En primera instancia se observa una etapa de retroceso (hasta fines de los 60), seguido de un período de avance o estabilidad (en los 70), luego un fuerte retroceso (década del 80-90) y finalmente, un período de retroceso relativamente bajo (00-10 en adelante).

Por último, mediante el análisis de las fluctuaciones del glaciar Alerce y su relación con las de otros glaciares de la región, fue posible identificar un patrón de comportamiento similar, inclusive a escala decadal. Por lo cual, se sugiere que, si bien existen diferencias para la década de los 70, la ponderación del glaciar Alerce como glaciar de referencia para los Andes de Patagonia Norte parece ser acertada.

En un contexto socioeconómicamente delicado, donde el financiamiento de la ciencia argentina resulta ser un limitante para la investigación (Stefani, 2018), contar con un glaciar que sea representativo de los cambios regionales, significa contar con una buena herramienta para el monitoreo del estado de los glaciares de los Andes del Norte de Patagonia y los Andes del Sur.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Anderson, R. S., & Anderson, S. P. (2010). *Geomorphology: The Mechanics and Chemistry of Landscapes*. Cambridge University Press.
- Arboit, M. E., & de Rosa, C. (2014). *Alcanzar la sostenibilidad ambiental, global y local, del hábitat humano: El imperativo fundamental en el siglo XXI. Primera Parte*. <http://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/20304>
- Arendt, A., Walsh, J., & Harrison, W. (2009). Changes of Glaciers and Climate in Northwestern North America during the Late Twentieth Century. *Journal of Climate*, 22(15), 4117-4134. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2784.1>
- Ayala, Á., Farías-Barahona, D., Huss, M., Pellicciotti, F., McPhee, J., & Farinotti, D. (2019). *Glacier runoff variations since 1955 in the Maipo River Basin, semiarid Andes of central Chile* [Preprint]. *Glaciers/Climate Interactions*. <https://doi.org/10.5194/tc-2019-233>
- Barros, V. R., Boninsegna, J. A., Camilloni, I. A., Chidiak, M., Magrín, G. O., & Rusticucci, M. (2015). Climate change in Argentina: Trends, projections, impacts and adaptation: Climate change in Argentina. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 6(2), 151-169. <https://doi.org/10.1002/wcc.316>
- Benn, D., & Evans, D. J. A. (2014). *Glaciers and Glaciation, 2nd edition*. Routledge.
- Benn, D. I., Warren, C. R., & Mottram, R. H. (2007). Calving processes and the dynamics of calving glaciers. *Earth-Science Reviews*, 82(3), 143-179. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.02.002>
- Bennett, M. M., & Glasser, N. F. (2011). *Glacial Geology: Ice Sheets and Landforms*. John Wiley & Sons.
- Bown, F., Carrión, D., Zenteno, P., & Rivera Ibáñez, S. (2012). *Glacier responses to recent volcanic activity in Southern Chile*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/117847>



- Bown, F., & Rivera, A. (2007). Climate changes and recent glacier behaviour in the Chilean Lake District. *Global and Planetary Change*, 59(1-4), 79-86. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.11.015>
- Bown González, F. (2004). Cambios climáticos en la región de Los Lagos y respuestas recientes del Glaciar Casa Pangué (41°08'S). *BTEL-CFB-CD-052*. <http://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/123456789/22868>
- Bradley, R. S., Keimig, F. T., & Diaz, H. F. (2004). Projected temperature changes along the American cordillera and the planned GCOS network. *Geophysical Research Letters*, 31(16). <https://doi.org/10.1029/2004GL020229>
- Buttstädt, M., Möller, M., Iturraspe, R., & Schneider, C. (2009). Mass balance evolution of Martial Este Glacier, Tierra del Fuego (Argentina) for the period 1960–2009. *Advances in Geosciences*, 22, 117-124. <https://doi.org/10.5194/adgeo-22-117-2009>
- Carrasco, J. F., Osorio, R., & Casassa, G. (2008). Secular trend of the equilibrium-line altitude on the western side of the southern Andes, derived from radiosonde and surface observations. *Journal of Glaciology*, 54(186), 538-550. <https://doi.org/10.3189/002214308785837002>
- CEPAL, C. E. para A. L. y el C. (2017, abril 25). *América Latina y el Caribe: Estimaciones y proyecciones de población* [Text]. <https://www.cepal.org/es/temas/proyecciones-demograficas/estimaciones-proyecciones-poblacion-total-urbana-rural-economicamente-activa>
- Cogley, J. G., Hock, R., Rasmussen, L. A., Arendt, A. A., Bauder, A., Braithwaite, R. J., Jansson, P., Kaser, G., Moller, M., Nicholson, L. I., & Zemp, M. (2011). GLOSSARY OF GLACIER MASS BALANCE AND RELATED TERMS. J.G. Cogley, R. Hock, L.A. Rasmussen, A.A. Arendt, A. Bauder, R.J. Braithwaite, P. Jansson, G. Kaser, M. Möller, L. Nicholson, and M. Zemp. 2011. Paris: UNESCO-IHP (IHP-VII Technical documents in hydrology 86, IACS contribution 2), vi + 114p, illustrated, soft cover. (Free download from URL: <http://unesdoc.unesco.org/images/0019/001925/192525E.pdf> or ordered as hard copy, at no charge, from [ihp@unesco.org](mailto:ihp@unesco.org)). *Polar Record*, 48(4). <https://doi.org/10.1017/S0032247411000805>
- Colgan, W., Rajaram, H., Abdalati, W., McCutchan, C., Mottram, R., Moussavi, M. S., & Grigsby, S. (2016). Glacier crevasses: Observations, models, and mass balance implications: Glacier Crevasses. *Reviews of Geophysics*, 54(1), 119-161. <https://doi.org/10.1002/2015RG000504>
- Cuffey, K. M., & Paterson, W. S. B. (2010). *The Physics of Glaciers*. Academic Press.
- Dussaillant, I., Berthier, E., Brun, F., Masiokas, M., Hugonnet, R., Favier, V., Rabatel, A., Pitte, P., & Ruiz, L. (2019). Two decades of glacier mass loss along the Andes. *Nature Geoscience*, 12(10), 802-808. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0432-5>
- Fariás-Barahona, D., Vivero, S., Casassa, G., Schaefer, M., Burger, F., Seehaus, T., Iribarren-Anaconda, P., Escobar, F., & Braun, M. H. (2019). Geodetic Mass Balances and Area Changes of Echaurren Norte Glacier (Central Andes, Chile) between 1955 and 2015. *Remote Sensing*, 11(3), 260. <https://doi.org/10.3390/rs11030260>



- Fountain, A. G., Hoffman, M. J., Granshaw, F., & Riedel, J. (2009). The 'benchmark glacier' concept – does it work? Lessons from the North Cascade Range, USA. *Annals of Glaciology*, 50(50), 163-168. <https://doi.org/10.3189/172756409787769690>
- Frey, H., Haeberli, W., Linsbauer, A., Huggel, C., & Paul, F. (2010). A multi-level strategy for anticipating future glacier lake formation and associated hazard potentials. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(2), 339-352. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-339-2010>
- Gelman Constantin, J., Ruiz, L., Villarosa, G., Outes, V., Bajano, F. N., He, C., Bajano, H., & Dawidowski, L. (2020). Measurements and modeling of snow albedo at Alerce Glacier, Argentina: Effects of volcanic ash, snow grain size, and cloudiness. *The Cryosphere*, 14(12), 4581-4601. <https://doi.org/10.5194/tc-14-4581-2020>
- Ghilardi, J. C., y Ruiz, L. (2020). Cambios en la Dinámica (1969-2019) de la lengua del Glaciar Manso, Parque Nacional Nahuel Huapi. En Actas de Trabajos Completos del E-ICES 14: Decimocuarto Encuentro del Centro Internacional de Ciencias de la Tierra. (Vol. 14, pp. 134-146). Comisión Nacional de Energía Atómica - CNEA.
- Hall, D. K., Bayr, K. J., Schöner, W., Bindschadler, R. A., & Chien, J. Y. L. (2003). Consideration of the errors inherent in mapping historical glacier positions in Austria from the ground and space (1893–2001). *Remote Sensing of Environment*, 86(4), 566-577. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00134-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00134-2)
- Hock, R., Rasul, G., Cáceres, B. E., & Gruber, S. (2019). *Chapter 2: High Mountain Areas — Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-2/>
- Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., Farinotti, D., Huss, M., Dussailant, I., Brun, F., & Kääb, A. (2021). Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*, 592(7856), 726-731. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z>
- Hwang, J. S. (2016). The Fourth Industrial Revolution (Industry 4.0): Intelligent Manufacturing. *INTELLIGENT MANUFACTURING*, 4.
- Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales, I. (2010). *Fundamentos y cronograma de ejecucion*. 87.
- IPBES, I. S.-P. P. on B. and E. S. (2019). *Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3553579>
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, Ö. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou, Eds.). Cambridge University Press.



- James, W. H. M., & Carrivick, J. L. (2016). Automated modelling of spatially-distributed glacier ice thickness and volume. *Computers & Geosciences*, 92, 90-103. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.04.007>
- Jiskoot, H. (2011). Dynamics of Glaciers. En V. P. Singh, P. Singh, & U. K. Haritashya (Eds.), *Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers* (pp. 245-256). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2\\_127](https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2_127)
- Kaser, G., Grosshauser, M., & Marzeion, B. (2010). Contribution potential of glaciers to water availability in different climate regimes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(47), 20223-20227. <https://doi.org/10.1073/pnas.1008162107>
- Kinnard, C., Ginot, P., Surazakov, A., MacDonell, S., Nicholson, L., Patris, N., Rabatel, A., Rivera, A., & Squeo, F. A. (2020). Mass Balance and Climate History of a High-Altitude Glacier, Desert Andes of Chile. *Frontiers in Earth Science*, 8, 40. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00040>
- Lea, J. M. (2018). The Google Earth Engine Digitisation Tool (GEEDiT) and the Margin change Quantification Tool (MaQiT) — simple tools for the rapid mapping and quantification of changing Earth surface margins. *Earth Surface Dynamics*, 6(3), 551-561. <https://doi.org/10.5194/esurf-6-551-2018>
- Lea, J. M., Mair, D. W. F., & Rea, B. R. (2014). Evaluation of existing and new methods of tracking glacier terminus change. *Journal of Glaciology*, 60(220), 323-332. <https://doi.org/10.3189/2014JoG13J061>
- Leclercq, P. W., Pitte, P., Giesen, R. H., Masiokas, M. H., & Oerlemans, J. (2012). Modelling and climatic interpretation of the length fluctuations of Glaciar Frías (north Patagonian Andes, Argentina) 1639–2009 AD. *Climate of the Past*, 8(5), 1385-1402. <https://doi.org/10.5194/cp-8-1385-2012>
- Lenaerts, J. T. M., Broeke, M. R. van den, Wessem, J. M. van, Berg, W. J. van de, Meijgaard, E. van, Ulft, L. H. van, & Schaefer, M. (2014). Extreme Precipitation and Climate Gradients in Patagonia Revealed by High-Resolution Regional Atmospheric Climate Modeling. *Journal of Climate*, 27(12), 4607-4621. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00579.1>
- Ley N° 26639. Régimen de Presupuestos Mínimos para la Preservación de los Glaciares y del Ambiente Periglacial, Senado y Cámara de Diputados de la Nación Argentina, 28 de octubre de 2010.
- Loriaux, T., & Ruiz, L. (2021). Spatio-Temporal Distribution of Supra-Glacial Ponds and Ice Cliffs on Verde Glacier, Chile. *Frontiers in Earth Science*, 9, 448. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.681071>
- MaQiT. (2018, junio 1). *University of Liverpool Google Earth Engine Tools*. <https://liverpoolgee.wordpress.com/maqit/>
- Masiokas, M. H., Rabatel, A., Rivera, A., Ruiz, L., Pitte, P., Ceballos, J. L., Barcaza, G., Soruco, A., Bown, F., Berthier, E., Dussailant, I., & MacDonell, S. (2020). A Review of



the Current State and Recent Changes of the Andean Cryosphere. *Frontiers in Earth Science*, 8, 99. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00099>

- Masiokas, M. H., Rivera, A., Espizua, L. E., Villalba, R., Delgado, S., & Aravena, J. C. (2009). Glacier fluctuations in extratropical South America during the past 1000years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3-4), 242-268. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2009.08.006>
- Masiokas, M. H., Villalba, R. A. L., Luckman, B. H., Lascano, M. E., Delgado, S. N. P., & Štěpánek, P. (2007). *Chang 20 th-century glacier recession and regional hydroclimatic changes in northwestern Patagonia*.
- Masiokas, M. H., Villalba, R., Luckman, B. H., Lascano, M. E., Delgado, S., & Stepanek, P. (2008). 20th-century glacier recession and regional hydroclimatic changes in northwestern Patagonia. *Global and Planetary Change*, 60(1), 85-100. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.031>
- Meier, M. F., & Post, A. (1987). Fast tidewater glaciers. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 92(B9), 9051-9058. <https://doi.org/10.1029/JB092iB09p09051>
- Nussbaumer, S. U., Nesje, A., & Zumbühl, H. J. (2011). Historical glacier fluctuations of Jostedalsbreen and Folgefonna (southern Norway) reassessed by new pictorial and written evidence. *The Holocene*, 21(3), 455-471. <https://doi.org/10.1177/0959683610385728>
- Oerlemans, J. (2001). *Glaciers and Climate Change*. CRC Press.
- OMS. (2003). *OMS | La cantidad de agua domiciliaria, el nivel del servicio y la salud*. WHO. [https://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/diseases/wsh0302/es/](https://www.who.int/water_sanitation_health/diseases/wsh0302/es/)
- O'Neill, D. W., Fanning, A. L., Lamb, W. F., & Steinberger, J. K. (2018). A good life for all within planetary boundaries. *Nature Sustainability*, 1(2), 88-95. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0021-4>
- Paul, F., & Andreassen, L. M. (2009). A new glacier inventory for the Svartisen region, Norway, from Landsat ETM+ data: Challenges and change assessment. *Journal of Glaciology*, 55(192), 607-618. <https://doi.org/10.3189/002214309789471003>
- Paul, F., Kääb, A., & Haeberli, W. (2007). Recent glacier changes in the Alps observed by satellite: Consequences for future monitoring strategies. *Global and Planetary Change*, 56(1), 111-122. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.007>
- Paul, F., & Mölg, N. (2014). Hasty retreat of glaciers in northern Patagonia from 1985 to 2011. *Journal of Glaciology*, 60(224), 1033-1043. <https://doi.org/10.3189/2014JoG14J104>
- Rabassa, J., Rubulis, S., & Suarez, J. (1978). Los glaciares del monte Tronador, Parque nacional de Nahuel Huapi (Rio Negro, Argentina). *Los glaciares del monte Tronador, Parque nacional de Nahuel Huapi (Rio Negro, Argentina)*, 14, 259-318.
- Rico Lozano, I. I. (2019). *Los glaciares de los Pirineos. Estudio glaciológico y dinámica actual en el contexto del cambio global*. <https://doi.org/10/33085>



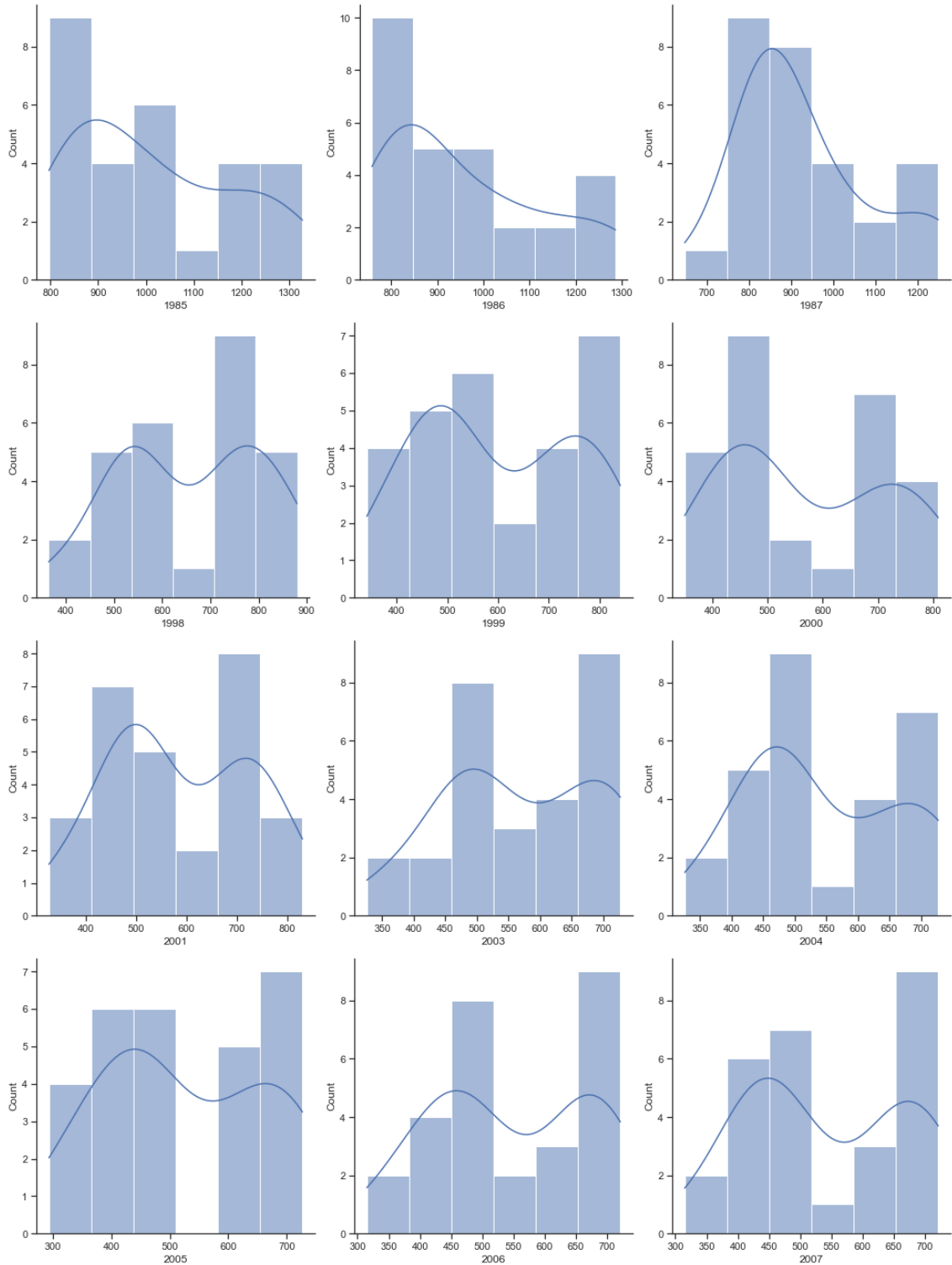
- Rivera, A., Bown, F., Casassa, G., Acuña, C., & Clavero, J. (2005). Glacier shrinkage and negative mass balance in the Chilean Lake District (40°S) / Rétrécissement glaciaire et bilan massique négatif dans la Région des Lacs du Chili (40°S). *Hydrological Sciences Journal*, 50(6), null-974. <https://doi.org/10.1623/hysj.2005.50.6.963>
- Rivera, J. A., Penalba, O. C., Villalba, R., & Araneo, D. C. (2017). Spatio-Temporal Patterns of the 2010–2015 Extreme Hydrological Drought across the Central Andes, Argentina. *Water*, 9(9), 652. <https://doi.org/10.3390/w9090652>
- Ruiz, L., Berthier, E., Masiokas, M., Pitte, P., & Villalba, R. (2015). First surface velocity maps for glaciers of Monte Tronador, North Patagonian Andes, derived from sequential Pléiades satellite images. *Journal of Glaciology*, 61(229), 908-922. <https://doi.org/10.3189/2015JoG14J134>
- Ruiz, L., Berthier, E., Viale, M., Pitte, P., & Masiokas, M. H. (2017). Recent geodetic mass balance of Monte Tronador glaciers, northern Patagonian Andes. *The Cryosphere*, 11(1), 619-634. <https://doi.org/10.5194/tc-11-619-2017>
- Ruiz, L., Masiokas, M. H., & Villalba, R. (2012). Fluctuations of Glaciar Esperanza Norte in the north Patagonian Andes of Argentina during the past 400 yr. *Climate of the Past*, 8(3), 1079-1090. <https://doi.org/10.5194/cp-8-1079-2012>
- Sagredo, E. A., & Lowell, T. V. (2012). Climatology of Andean glaciers: A framework to understand glacier response to climate change. *Global and Planetary Change*, 86-87, 101-109. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.02.010>
- Schoolmeester, T., Johansen, K. S., Alftan, B., Baker, B., Hesping, M., & Verbist, K. (2018). *El Atlas de Glaciares y Aguas Andinos: El impacto del retroceso de los glaciares sobre los recursos hídricos—UNESCO Biblioteca Digital*. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000266209?fbclid=IwAR1Zl4kOgQVSQdP VaOLQmahODFfg04Essl0zD2rXH9pbWnNk6YYm0ul46-E>
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. (2019, septiembre 26). *Atlas de glaciares de la Argentina*. Argentina.gob.ar. <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/agua/glaciares/atlas>
- Singh, V. P., Singh, P., & Haritashya, U. K. (2011). *Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers*. Springer Science & Business Media.
- Sistema de Información de Biodiversidad (SIB). 06-08-2021. *Visitantes APN*. <https://sib.gob.ar/institucional/visitantes-apn>
- Stefani, F. (2018). *Rol actual y futuro de la ciencia en la innovación industrial y el crecimiento económico en Argentina*. Centro de Investigaciones en Bionanociencias (CIBION). Informe publicado en: <http://www.nano.df.uba.ar/wordpress/wp-content/uploads/Stefani-2018-Rolactual-y-futuro-de-la-ciencia-en-la-innovacion-industrial-en-Argentina.pdf>
- Tarback, E. J., Lutgens, & Frederick K. (2013). *Ciencias de la tierra: Una introducción a la geología física*.



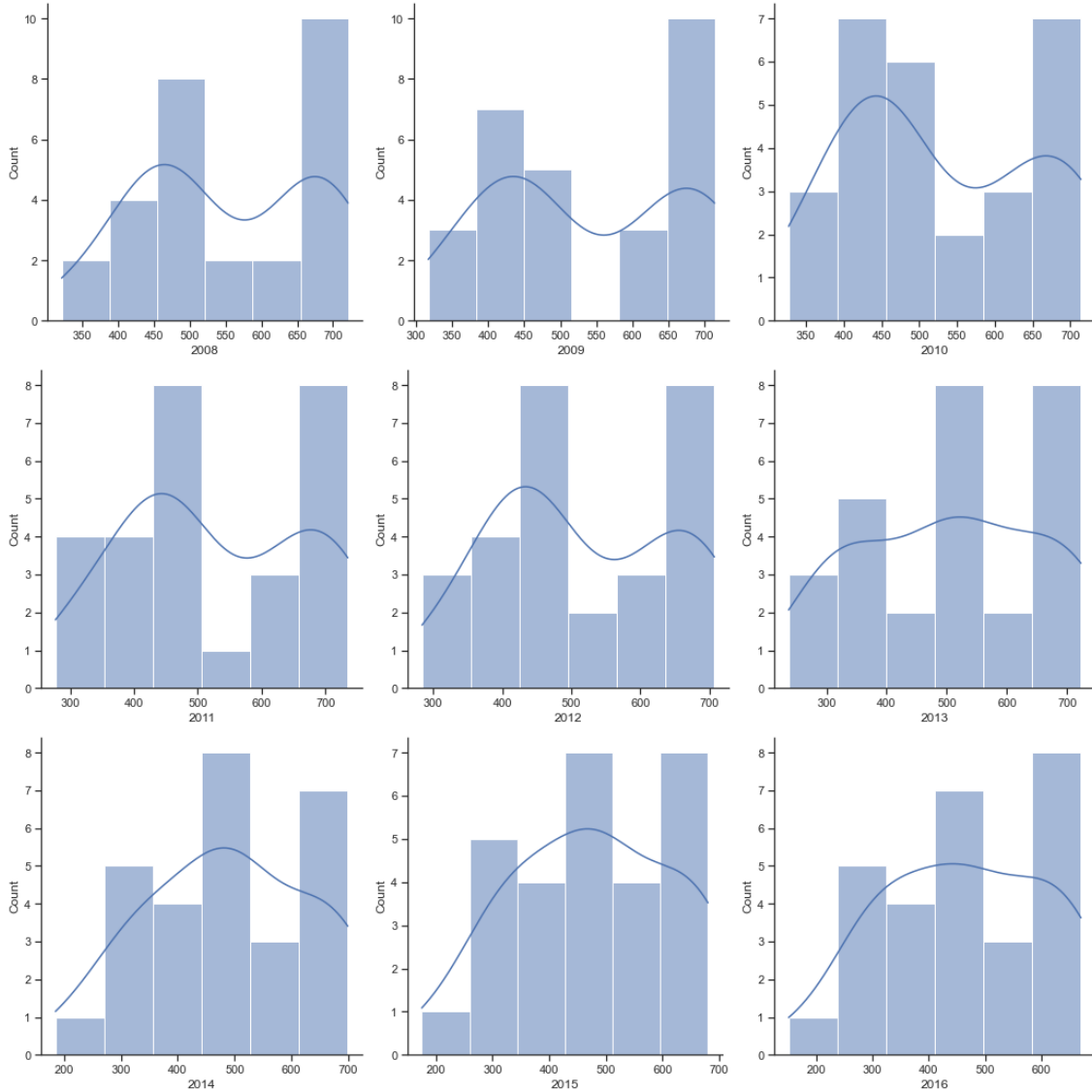
- USGS-EROS, E. R. O. and S. (2018). *USGS Landsat 5 TM Collection 1 Tier 1 Raw Scenes | Earth Engine Data Catalog | Google Developers*. [https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT\\_LT05\\_C01\\_T1?hl=es-419](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT_LT05_C01_T1?hl=es-419)
- Viale, M., & Garreaud, R. (2015). Orographic effects of the subtropical and extratropical Andes on upwind precipitating clouds. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(10), 4962-4974. <https://doi.org/10.1002/2014JD023014>
- Villalba, R., Boninsegna, J. A., Veblen, T. T., Schmelter, A., & Rubulis, S. (1997). Recent Trends in Tree-Ring Records from High Elevation Sites in the Andes of Northern Patagonia. En H. F. Diaz, M. Beniston, & R. S. Bradley (Eds.), *Climatic Change at High Elevation Sites* (pp. 193-222). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-015-8905-5\\_11](https://doi.org/10.1007/978-94-015-8905-5_11)
- WGMS, W. G. M. S. (2021, noviembre 26). 'Reference glaciers' for mass balance. *'Reference Glaciers' for Mass Balance - World Glacier Monitoring Service*. [https://wgms.ch/products\\_ref\\_glaciers/](https://wgms.ch/products_ref_glaciers/)
- Wulder, M. A., Loveland, T. R., Roy, D. P., Crawford, C. J., Masek, J. G., Woodcock, C. E., Allen, R. G., Anderson, M. C., Belward, A. S., Cohen, W. B., Dwyer, J., Erb, A., Gao, F., Griffiths, P., Helder, D., Hermosilla, T., Hipple, J. D., Hostert, P., Hughes, M. J., ... Zhu, Z. (2019). Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote Sensing of Environment*, 225, 127-147. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.015>
- Wulder, M. A., Ortlepp, S. M., White, J. C., & Maxwell, S. (2008). Evaluation of Landsat-7 SLC-off image products for forest change detection. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 34(2), 93-99. <https://doi.org/10.5589/m08-020>
- Zemp, M., Frey, H., Gärtner-Roer, I., Nussbaumer, S. U., Hoelzle, M., Paul, F., Haeberli, W., Denzinger, F., Ahlstrøm, A. P., Anderson, B., Bajracharya, S., Baroni, C., Braun, L. N., Cáceres, B. E., Casassa, G., Cobos, G., Dávila, L. R., Delgado Granados, H., Demuth, M. N., ... Vincent, C. (2015). Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century. *Journal of Glaciology*, 61(228), 745-762. <https://doi.org/10.3189/2015JoG15J017>
- Zemp, M., Huss, M., Thibert, E., Eckert, N., McNabb, R., Huber, J., Barandun, M., Machguth, H., Nussbaumer, S. U., Gärtner-Roer, I., Thomson, L., Paul, F., Maussion, F., Kutuzov, S., & Cogley, J. G. (2019). Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016. *Nature*, 568(7752), 382. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1071-0>
- Zemp, M., Roer, I., Käab, A., Hoelzle, M., Paul, F., & Haeberli, W. (2008). WGMS (2008): Global glacier changes: facts and figures. *Zemp, Michael; Roer, I; Käab, A; Hoelzle, M; Paul, F; Haeberli, W (2008). WGMS (2008): Global Glacier Changes: Facts and Figures. Genf: World Glacier Monitoring Service*. <https://doi.org/info:doi/10.5167/uzh-4173>
- Zorzut, V., Ruiz, L., Rivera, A., Pitte, P., Villalba, R., & Medrzycka, D. (2020). Slope estimation influences on ice thickness inversion models: A case study for Monte Tronador glaciers, North Patagonian Andes. *Journal of Glaciology*, 66(260), 996-1005. <https://doi.org/10.1017/jog.2020.64>

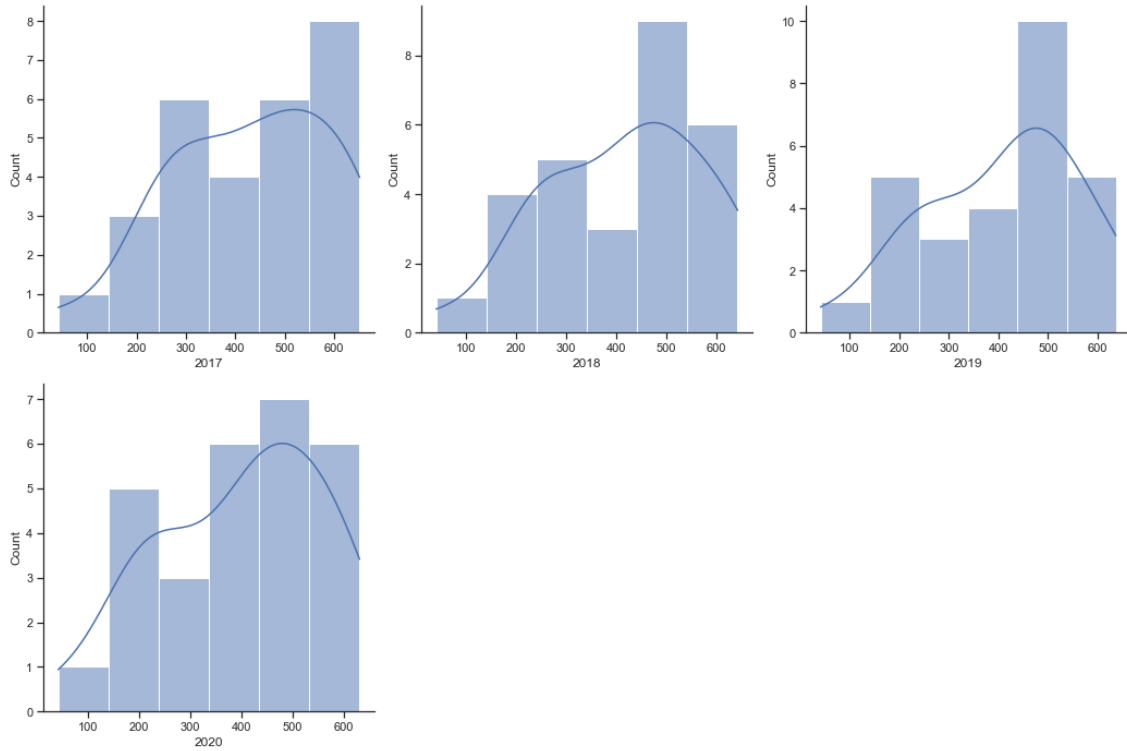


## 10. ANEXO









**Figura 18.** Histogramas para evaluar normalidad de datos en método multilínea.