

# DINÁMICA DEL MOVIMIENTO EN LOS GLACIARES ESCONDIDOS DEL CHPS

Ortone Lois, Ailin Sol<sup>1,2,\*</sup>  
Pilato, Guido Luis<sup>1</sup>  
Gari, Jorge Marcelo<sup>1</sup>  
Barrios, Abril<sup>3</sup>  
Macote Yparraguirre, Erick Leone<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Haedo

<sup>2</sup> Centro de Sensores Remotos, Fuerza Aérea Argentina

<sup>3</sup> Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía

\* ailin.ortone@gmail.com

## RESUMEN

En los glaciares ubicados al suroeste del Campo de Hielo Patagónico Sur, denominados Glaciares Escondidos, se verifica un marcado retroceso de sus frentes, sobre todo en los últimos 35 años. La cuenca continental que divide los dos océanos, está actualmente localizada en estos glaciares. En efecto, la alimentación de los glaciares Dickson y Frías se hacía originalmente por una sola corriente de hielo. Comenzando por la zona del cerro Cubo, sus aguas recorrían los más de 250 km necesarios para atravesar por completo la árida llanura de la Patagonia, y desembocar finalmente, en el Océano Atlántico. En el presente estudio multitemporal con imágenes de sensores ópticos de resolución espacial media Landsat y Sentinel, se realizó un seguimiento de la dinámica de los mismos, observando formaciones de lagos proglaciares, acumulación de sedimentos en el movimiento de las morenas y obteniendo a su vez conclusiones relacionadas a la cuenca hídrica. Asimismo, se estimaron velocidades superficiales del hielo sobre estos glaciares mediante mediciones multitemporales y la técnica de offset tracking, en base a imágenes satelitales de radar. Esta área fue seleccionada ya que en estudios desarrollados durante proyectos anteriores se pudieron observar grandes modificaciones en la misma, el retroceso es notorio desde la década del 80. Es importante aclarar que no existen muchos antecedentes de investigación en el país mediante imágenes satelitales de este glaciar.

## PALABRAS CLAVE

Glaciares Escondidos – Frías – CHPS – Retroceso glaciar – SAR

## ABSTRACT

There has been a marked retreat of the glaciers located to the southwest of the Southern Patagonian Ice Field, called Glaciares Escondidos (Hidden in english), especially in the last 35 years. The continental basin that divides Pacific and Atlantic oceans is currently located in these glaciers. Indeed, Dickson and Frías glaciers were originally fed by a single stream of ice. Starting at Cerro Cubo, the waters traveled the more than 250 km necessary to completely cross the arid plain of Patagonia, and finally flow into the Atlantic Ocean. This paper presents a multitemporal study with remote sensing images from Landsat and Sentinel sensors, both medium spatial resolutions. Successively, we monitor their dynamics, observing formations of proglacial lakes, accumulation of sediments and movement of moraines, providing conclusions related to the water basin. Likewise, we estimated surface ice speeds on these glaciers using multitemporal measurements and offset tracking technique, based on satellite radar images. This area was selected because we observed great retreat in previous studies, which becomes more prominent since the 80s. It is worth mentioning that there has not been much research on this group of glaciers in the country.

## KEYWORDS

Glaciares Escondidos – Frías – SPI – Glacier Retreat – SAR

## INTRODUCCIÓN

El Hielo Continental Patagónico (CHCP) con sus 20.100 km<sup>2</sup> es el área glaciaria más extensa fuera de la Antártida. Se extiende en dirección N/S entre los paralelos 46° y 51° 30', abarcando desde el Pacífico hasta los grandes lagos patagónicos australes. El HCP se divide en dos sectores separados por el Estero Baker que desagua en el Lago Buenos Aires y el Río Pascua que desemboca en el Lago San Martín. Esas dos grandes áreas poseen hacia el Norte 7600 km<sup>2</sup> y hacia el Sur 12500 km<sup>2</sup>. Comprenden una gran cantidad de glaciares distribuidos en 48 cuencas, siendo los más importantes del tipo Andino ó de valle, donde la unión de sus lenguas forma cada uno de los glaciares compuestos. Estos descienden desde una altitud máxima de 3600 m desde la Cordillera de los Andes, divisoria de aguas en dirección Este hacia territorio argentino, terminando sus frentes en lagos glaciarios como los lagos Argentino y Viedma y hacia el Oeste en territorio chileno, desembocando en fiordos marinos.

La gran mayoría de estos glaciares se encuentran en un proceso de franco retroceso, especialmente desde 1990.

El monitoreo de glaciares es esencial para estimar futuros cambios en la morfología, así como también comprender su comportamiento no solo en el presente sino a futuro. Es necesario desarrollar metodologías y criterios críticos que sean acordes a la zona de estudio. En los últimos años, se han llevado a cabo campañas de mediciones y estudios multitemporales, investigaciones que incluyen en su análisis balances de masa que han puesto en evidencia la regresión de los frentes glaciarios con grandes desprendimientos de témpanos o *calving*, adelgazamiento y pérdida de masa sobre todo en las áreas de ablación.

## 1. ÁREA DE ESTUDIO

Comprende la zona SE del HCP, abarcando la parte sur del Parque Nacional Los Glaciares y áreas aledañas. Allí se encuentran el Glaciar Frías o Grande, el Glaciar Cono o Gorra y el Glaciar Dickson del lado chileno, también denominados en su conjunto como Glaciares Escondidos (Fig. 1).

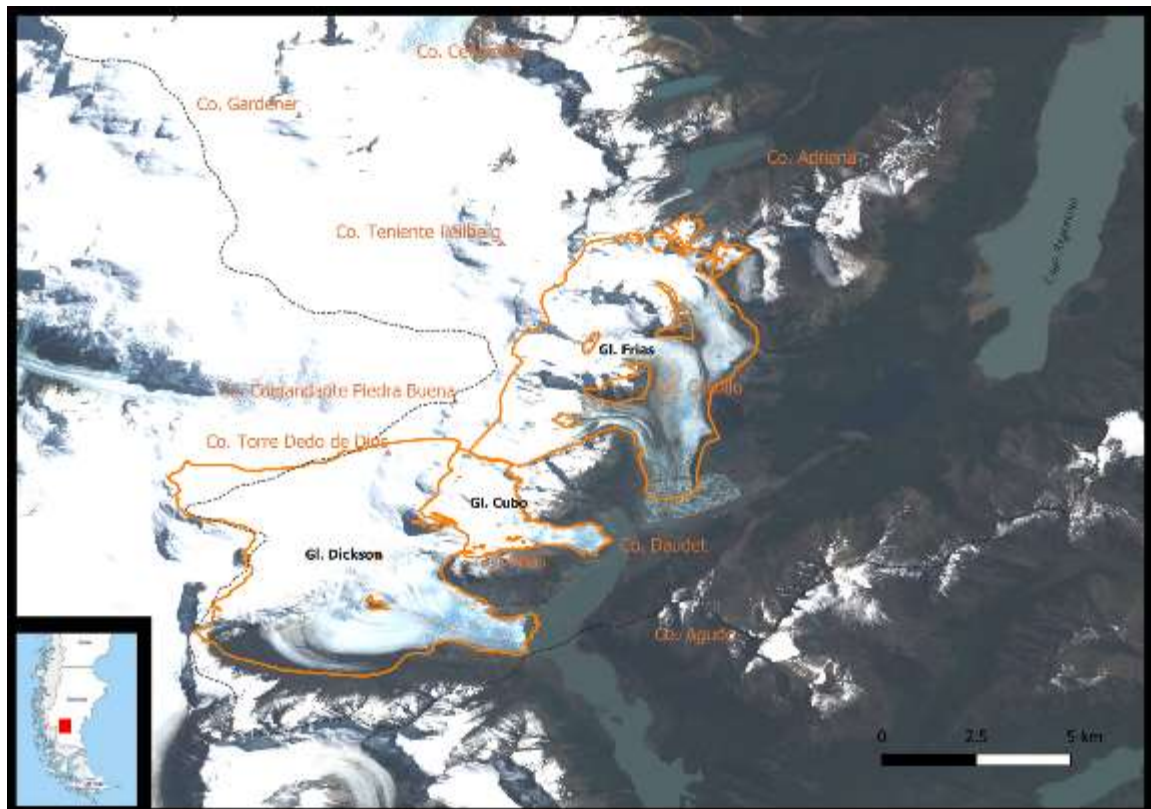


Fig. 1. Área de estudio: en naranja se encuentra marcada la ubicación del grupo de glaciares en la provincia de Santa Cruz, al sur del Parque Nacional Los Glaciares en la Patagonia Argentina.

Parte de la topografía del lugar, fue relevada por el explorador Padre De Agostini quien estuvo en ese sector andino en 1916 y retornó en 1929, pudiendo constatar que el frente del Glaciar Dickson,

que pasa por la cabecera norte del lago homónimo, se encontraba en notable retroceso. En su relato, dice que, por su costado noroeste, el Ventisquero Dickson se comunica por una profunda depresión glacial con otra corriente de hielo (presumiblemente el Glaciar Frías) que desciende de la Cordillera hacia la cuenca del Brazo Rico del Lago Argentino. El relleno de este boquete, como pudo observar en una excursión que efectuó en el verano de 1916 subiendo desde el Lago Argentino, está sujeto a intensa ablación y se presenta cubierto de un gran manto de morenas y sembrado de pequeños estanques de hielo donde se origina el Río Frías, que desemboca en el lago del mismo nombre a pocos kilómetros del Brazo Rico.

En viajes de campo realizados recientemente se pudo constatar que el caudal de agua del Río Frías es muy bajo. Al recorrer el final de su lecho rocoso, se observa un balcón natural de sedimentos morrénicos que rodean una laguna proglaciaria con témpanos, desde la que se observa un gran retroceso y deterioro de los frentes en los Glaciares Frías o Grande y Gorra o Cono. El glaciar Frías ha experimentado un comportamiento bastante diferente durante el siglo XX pues su área de ablación está cubierta de sedimentos. Las mayores líneas de corte y morenas pueden ser vistas tanto en fotografías aéreas e imágenes satelitales como en campo. Al igual que el glaciar Dickson, se estima que esas morenas corresponden a la Pequeña Edad del Hielo (PEH) (Marden y Clapperton, 1995). El Glaciar Dickson hace ya muchos años que no se conecta más con el Glaciar Frías, y se espera que su frente disminuya más allá del Monte Stokes en los próximos años.

Estos glaciares han ido aportando agua de fusión al Lago Argentino desde la PEH, sin embargo, en 1998, 2000 y 2003 se observó una fuerte disección del cinturón de la morena que separa el glaciar Frías del Dickson. Este proceso se debió a la evacuación del agua de fusión del Frías hacia el oeste a través de una gran corriente glaciaria. Como resultado, la cuenca continental que divide los dos océanos está actualmente localizada en este glaciar (Rivera y Cassasa, 2004). En efecto, la alimentación de los glaciares Dickson y Frías se hacía originalmente por una sola corriente de hielo formada en la zona del cerro Cubo, que luego se bifurcaba, una hacia el sureste formando el primero de los cursos nombrados y otra hacia el noreste, dando origen al Frías. Ahora bien, debido a la deglaciación de dicha cuenca, como en general en todo el Campo de Hielo Patagónico Sur a partir del quinto final del siglo XX, el receso glaciar se hizo más pronunciado y notorio por la fusión de gran cantidad de hielo cuyas aguas encontraron una vía de escape en la zona de contacto del Dickson con la ribera rocosa de la margen izquierda del lago homónimo, flujo que a su vez aceleró el deshielo y la evacuación, con resultado del vaciamiento de un depósito formado en la zona norte de separación de aquél con el Frías. Esto sugiere la posibilidad de una intercomunicación entre las cuencas del lago Dickson y la laguna Frías que desaguan, respectivamente, al océano Pacífico y al océano Atlántico (Martinic, 2010).

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1 ICESat/GLAS**

La altimetría láser de imágenes compite con el método de interferometría SAR (radar de apertura sintética), siendo ésta una medición directa que genera puntos tridimensionales y requiere un menor esfuerzo manual para el procesamiento de datos. En este estudio, se obtuvieron 358 puntos del instrumento GLAS (Geoscience Laser Altimeter System) y ATLAS (Advanced Topographic Laser Altimeter System) a bordo del satélite ICESat y ICESat 2 respectivamente, descargados del Centro Nacional de datos de hielo y nieve (NSIDC). Los productos disponibles para el período 2003-2009 y 2018 a la actualidad, son denominados Global Land Surface Altimetry Data y Advanced Topographic Laser, los cuales fueron pre-procesados y filtrados usando una máscara, ordenándolos según disponibilidad de fechas. Los datos obtenidos de éstos instrumentos son distribuidos en formato binario, por lo que para su procesamiento fueron convertidos a ASCII con la herramienta *Altimetry elevation extractor Tool* (NGAT), provista por el NSIDC GLAS.

### **2.2 IMÁGENES ÓPTICAS**

Dado que la presencia de nubes en el área está directamente relacionada con la posibilidad de observar el terreno, es necesario que las mismas estén libres de nubosidad. Contar con imágenes de la época estival es otro factor importante a tener en cuenta. De esta manera, se procesa la información disponible en el período de menor volumen de nieve sobre el glaciar. Tomando estos parámetros, se seleccionaron 21 imágenes, de acuerdo a la Tabla 1, disponibles en forma gratuita en el banco de

imágenes de USGS *U.S. Geological Survey*. El primer registro disponible de una imagen aérea sobre esta área, data de octubre de 1965, donde no existía ningún lago entre los glaciares Frías y Dickson, sino que formaban una sola masa de hielo. Esto mismo puede apreciarse en cartografía antigua como en las Figuras 2a y 2b.

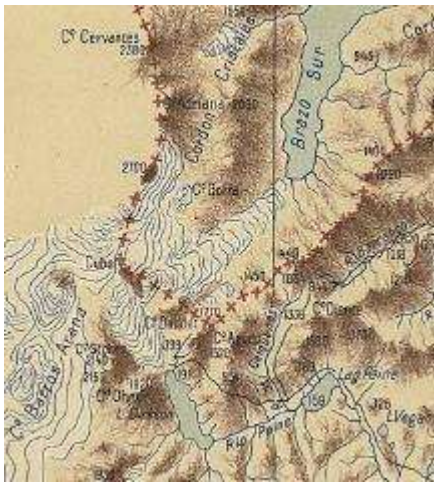


Fig. 2a. Cartografía antigua (Risopatrón)



Fig. 2b. Cartografía de 1956 (Lliboutry, 1956)

La imagen que se observa en la Figura 3 pertenece al sistema CORONA, misión 1025 KH-4A y tiene una resolución espacial menor a 3 metros. Fue obtenida del mismo banco de imágenes de USGS y fue georeferenciada a partir de una imagen Landsat.

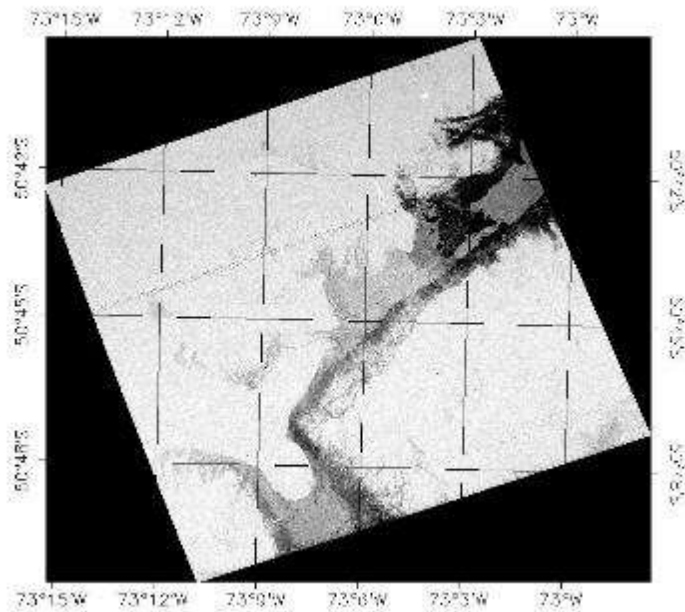


Fig. 3. Imagen aérea del sistema Corona del año 1965

El satélite Corona adquirió fotografías con un sistema de cámara telescópica y cargó la película expuesta en cápsulas de recuperación. Las cápsulas o cubos fueron recuperados por aviones mientras las cápsulas se lanzaban en paracaídas a la tierra. Los sistemas KH-4A llevaban dos cámaras panorámicas con un ángulo de separación de 30 ° con una cámara mirando hacia adelante y la otra mirando hacia atrás. (USGS, 2020)

### 2.3 IMÁGENES RADAR

Se utilizaron tres imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR) disponibles en la base de datos científica de Sentinel, del programa europeo Copernicus, Pertenecen del satélite Sentinel 1-B, radar de banda C, modo de adquisición: Interferometric Wide (IW), Level 1, de polarización dual y tamaño de pixel 10 m.

- S1B\_IW\_GRDH\_1SDV\_20190830
- S1B\_IW\_GRDH\_1SDV\_20200214
- S1B\_IW\_GRDH\_1SDV\_20200226

Copernicus (antes conocido como GMES, Vigilancia Mundial del Medio Ambiente y la Seguridad) es el programa de la Unión Europea de observación de la Tierra, el cual consiste en un conjunto complejo de sistemas que recaban datos de múltiples fuentes tales como satélites de observación de la Tierra y sensores fijos, como estaciones terrestres, además de sensores transportados por aire y por mar. Este satélite permite obtener imágenes con distinta resolución (de hasta 10 m) y cobertura (hasta 250 km), lo cual permite un seguimiento fidedigno y reiterado de zonas amplias.

## **2.4 MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN**

Se utilizaron en total cuatro modelos digitales de elevación o DEMs, de las misiones SRTM, ASTER GDEM, ALOS PALSAR y TANDEM X.

Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) cuenta con una resolución de 1 segundo de arco por pixel (aproximadamente 30 metros) y fue desarrollado por el Jet Propulsion Laboratory de la NASA a bordo del Space Shuttle Endeavour, lanzado el 11 de febrero del 2000, el cual tomó datos de altura de casi toda la superficie terrestre durante diez días de operación. Este fue utilizado para la corrección de terreno de las imágenes radar (NASA, 2016).

El ASTER GDEM, Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model, según sus siglas en inglés, Versión 3 (GDEM 003) es una operación conjunta entre la NASA y el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (METI). La versión 3 fue lanzada en agosto del 2019 y posee una resolución espacial de 1 arcosegundo.

El Advanced Land Observing Satellite (ALOS), de la misión PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar), posee una resolución espacial de 1 arcosegundo y su período de revisita es de 46 días. Registró datos entre enero de 2006 y mayo de 2011.

TanDEM-X es una misión de la agencia DLR (German Aerospace Center), equipada con un Radar de Apertura Sintética de alta resolución, posee una resolución espacial de 3 arcosegundos y un período de revisita de 11 días. Los datos adquiridos fueron completados en enero de 2015 y la producción del DEM a nivel global se completó en septiembre de 2016. Para los procesamientos de las imágenes se implementó la aplicación SNAP de uso libre (acrónimo en inglés de Sentinel Application Platform), proporcionado por la Agencia Espacial Europea. A partir de la aplicación Sentinel Toolbox del SNAP se procesaron las imágenes radar del satélite Sentinel 1. La disponibilidad de herramientas libres y procesamientos mejorados es un aspecto muy importante para el estudio y análisis de la información geoespacial, la cual se hizo haciendo uso del software QGIS 3.6. Éste es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de Código Abierto licenciado bajo GNU - General Public License, basado en un proyecto oficial de Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). Para la selección de datos, se usaron las máscaras que delimitan el área glaciar, obtenidas de la web oficial de GLIMS.

## **3. DESARROLLO**

### **3.1 ANÁLISIS DE RETROCESO**

Se realizó una búsqueda de imágenes ópticas de la zona de estudio, preferentemente de la época estival y con la menor cobertura de nubes y nieve posible para identificar de forma precisa las áreas de ablación y acumulación de los glaciares. Para realizar este estudio multitemporal, se utilizó el sistema de proyección UTM WGS-84 Zona 18S, se corregistraron las imágenes abarcando el área de interés, ya que provienen de diferentes satélites y poseen distintas fechas de adquisición. De esta



forma, se obtuvieron mediciones de retroceso entre el año 1965 y la actualidad, lo cual se puede visualizar en la Figura 4.

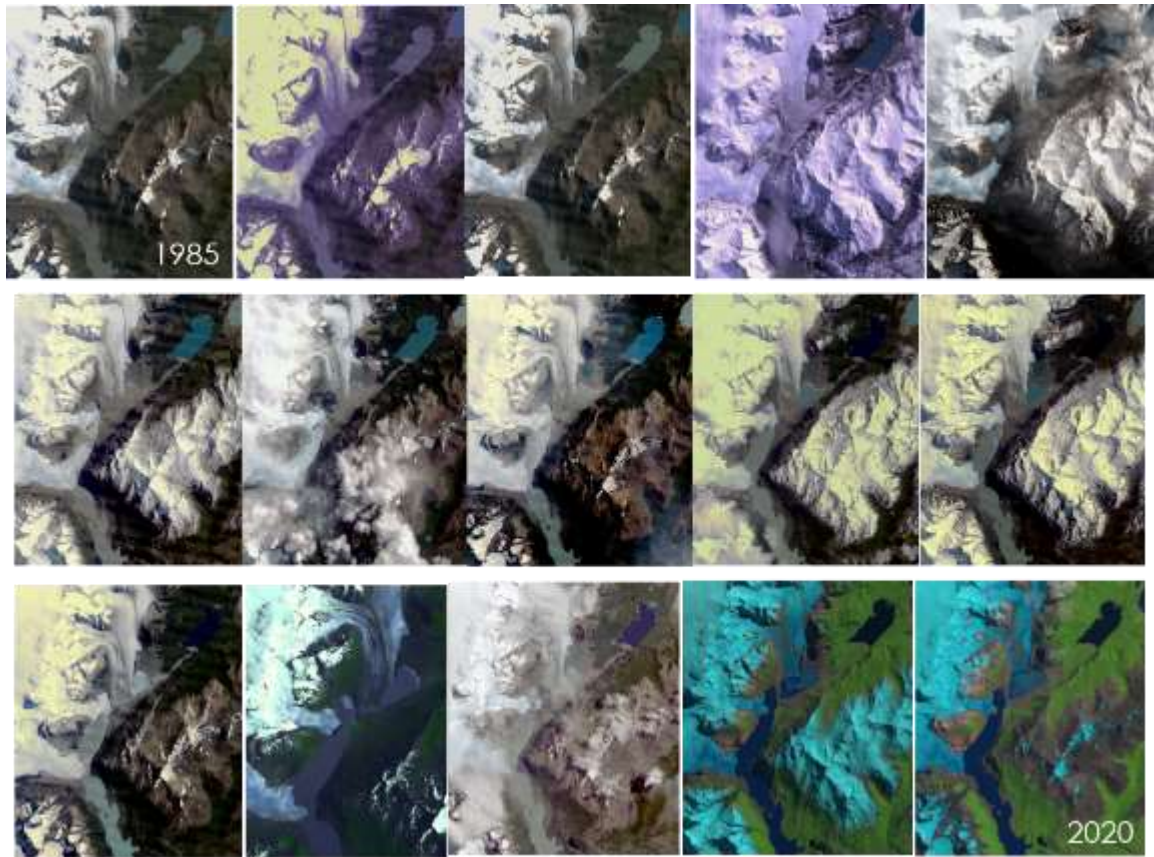


Fig. 4. Interpretación visual del retroceso de los Glaciares Escondidos tomado por sensores de los satélites Landsat 2, 3, 4, 5, 7, SPOT y Sentinel 2 entre 1985 y 2020

Se delimitó el área de estudio a la zona de los Glaciares Escondidos que comprende los glaciares Frías, Cubo y Dickson, realizando el cálculo de área perdida a partir de la técnica de superposición de bandas de distintas fechas, aplicadas a los tres canales RGB de visualización multiespectral para la detección de cambios. La Figura 5 muestra el lugar donde se encontraban los frentes de estos glaciares en los años 1965, 1984 y 2020. Luego los valores obtenidos se representaron en una tabla de cálculo (Tabla 1) y en gráficos para su mejor interpretación (Figuras 6 y 7).

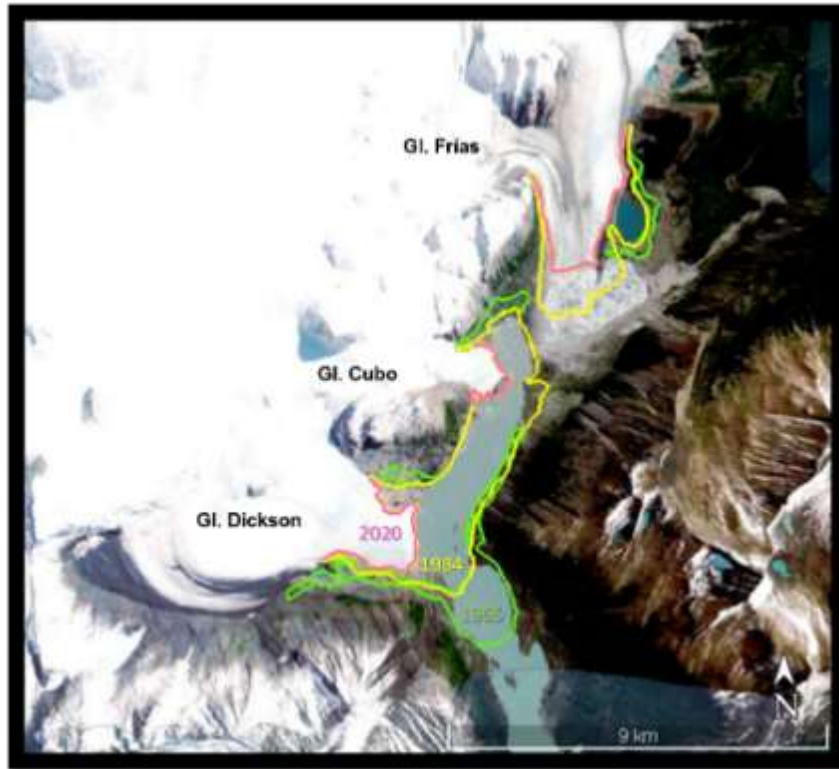


Fig. 5. Están marcados los frentes de estos glaciares en los años 1965, 1984 y 2020.

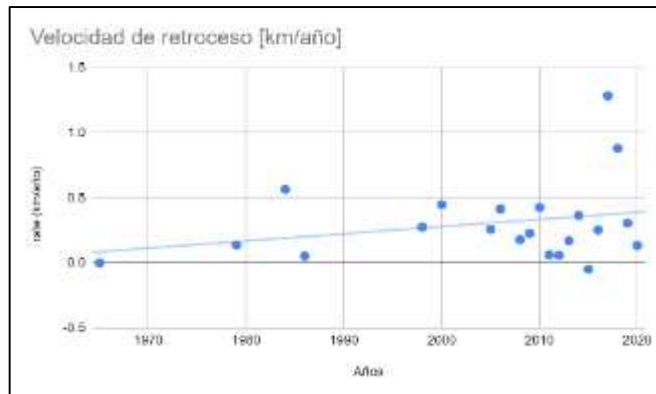


Fig. 6. Gráfico de tendencia de la velocidad de retroceso anual de los Glaciares Escondidos medido en kilómetros por año.



Fig. 7. Retroceso superficial de los Glaciares Escondidos entre 1965 y 2020 medido en  $\text{km}^2$

Tabla 1. Imágenes disponibles y mediciones de retroceso superficial y velocidad de retroceso anual.

Años	Sensor (resolución)	Medición (km <sup>2</sup> )	Vel (km/año)
1965	aérea	0,0000	0,0000
1979	mss (60m)	1,9470	0,1391
1984	tm (30m)	4,7730	0,5652
1986	tm (30m)	4,8783	0,0526
1998	tm ( 30 m)	8,1963	0,2765
2000	Etm + (30m)	9,0933	0,4485
2005	tm (30m)	10,3843	0,2582
2006	Etm + y tm ( 30 m)	10,7990	0,4147
2008	Etm + y tm ( 30 m)	11,1567	0,1789
2009	Etm + (30m)	11,3840	0,2273
2010	Etm + (30m)	11,8098	0,4258
2011	Etm + (30m)	11,8715	0,0617
2012	Etm + (30m)	11,9292	0,0576
2013	Etm + (30m)	12,1001	0,1710
2014	Etm + (30m)	12,4643	0,3641
2015	S2 (10m)	12,4175	-0,0468
2016	S2 (10m)	12,6714	0,2539
2017	S2 10m)	13,9562	1,2848
2018	S2 (10m)	14,8368	0,8807
2019	S2 (10m)	15,1429	0,3060
2020	S2 (10m)	15,2773	0,1345

Una forma visual de interpretar la velocidad de movimiento del glaciar Frías en este caso, es hacer un seguimiento de los detritos que puedan ser bien diferenciables en las imágenes, como se muestra en la Figura 8. Allí se aprecia claramente el movimiento de una masa de sedimentos rocosos en la superficie que aparece por primera vez en el año 2017, la cual pudo ser producto de fuertes vientos que depositaron ese material o bien un desprendimiento del mismo, proveniente de la ladera norte de un cerro del cuál no obtuvimos cartografía nombrada, por lo que asumimos no posee denominación y aquí mencionaremos como “Cerro Bertone” (S 50,72546; O 73,16401, con 1706 m. de altura). Esta mancha se desplaza a la velocidad de movimiento del hielo, siendo un buen indicador de la dinámica del glaciar que puede observarse a simple vista (Fig. 8).



Fig. 8. Movimiento de un conjunto de detritos en la margen sur del glaciar Frías (marcado en la primera imagen con un círculo) entre los años 2017 y 2020

Este tipo de depósitos de material detrítico difiere de las morrenas glaciares activas las cuales se mantienen constantes en el tiempo ya que el mismo movimiento del hielo reelabora el sedimento morrénico, siendo este proceso una clase de glaciectonismo.

### 3.1 IDENTIFICACIÓN DE VARIACIONES DE ALTURAS

A través del estudio de alturas sobre la superficie del área glaciar, se realiza un acercamiento a la estimación de retrocesos multitemporales como complemento del presente trabajo, así como también se establecen las pautas para futuras investigaciones donde se busquen posibles cambios



morfológicos. En este caso, se usaron los datos obtenidos por el instrumento GLAS, y los Modelos digitales de elevación antes descritos. Con ese paso establecido, se trabajó la imagen en degradé de colores desde el azul hasta el rojo para discernir y realzar las zonas que tendrán las mayores alturas.

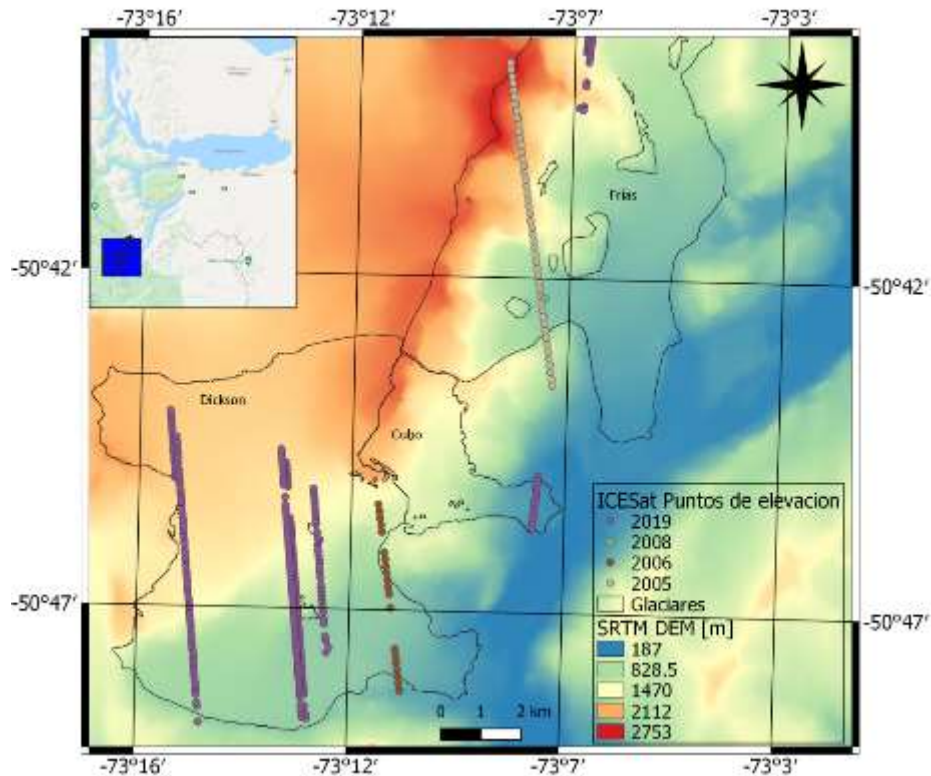


Fig. 9. Puntos de control de alturas de los satélites ICESat sobre los tres glaciares.

Tomando puntos de referencia sobre la superficie de cada glaciar y siguiendo la órbita realizada por el satélite ICESat, se observó la diferencia de elevación entre los años 2000 y 2019 trazando perfiles topográficos. La exactitud geoespacial de los datos GLA14 y ATL08 en cada *footprint* es del orden de los 5 metros horizontales y 10 centímetros verticales para pendientes inferiores a 1°, siendo en este caso el punto patrón, ya que es el que menor margen de error acusa.

El error cuadrático medio (RMSE) (también llamado desviación cuadrática media, RMSD) es una medida de uso frecuente de la diferencia entre los valores predichos por un modelo y los valores realmente observados en el entorno que se está modelando. Estas diferencias individuales también se denominan residuos. El error cuadrático medio mide cuánto error hay entre dos conjuntos de datos. (AgriMetSoft, 2019)

Calculando cada DEM frente a los datos del ICESat con la fórmula

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{model,i})^2}{n}}$$

Donde n es 2 porque la comparación es siempre respecto a las mediciones obtenidas de la misión ICESat e ICESat 2, e i es 14, que corresponde al total de muestras.

En la Tabla 2 se muestran los resultados, y en la Figura 10 se muestran los gráficos del error cuadrático medio.

Tabla 2. Comparación de valores RMSD de las distintas misiones.

Misión	TANDEM	ALOS	SRTM	ASTER
RMSE(m)	14,046	14,295	14,323	18,57

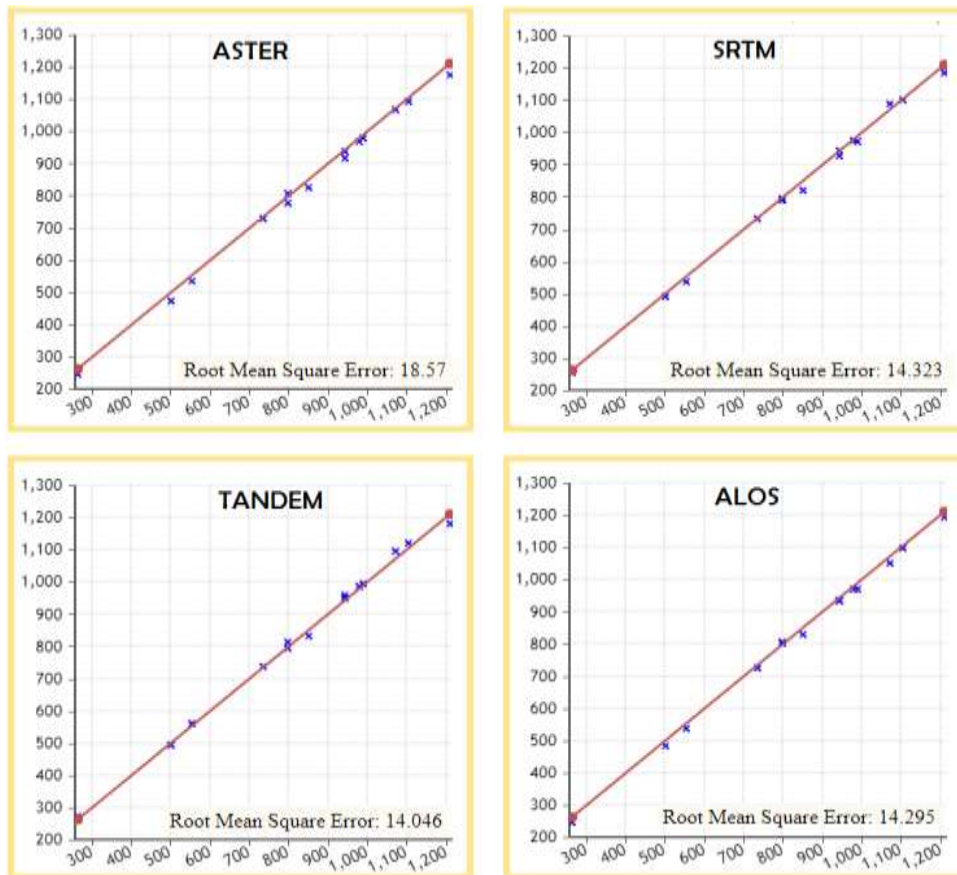


Fig. 10. Error cuadrático medio de las misiones ASTER, SRTM, TANDEM X y ALOS PALSAR respecto a los puntos de control del ICESat.

El menor RMSE obtenido para este trabajo es en el producto provisto por TANDEM, siendo el valor de 14,046 m. Se observa también que para ALOS y SRTM se mantiene un error parecido, siendo el DEM de ASTER quien lleva más error cuadrático medio, de 18.57 m.

En las Figuras 11, 12 y 13 se puede observar la variación de alturas sobre el glaciar Cubo, Frías y Dickson respectivamente, entre los años 2000 y 2019 correspondientes a los datos de alturas tomados por los distintos sensores.

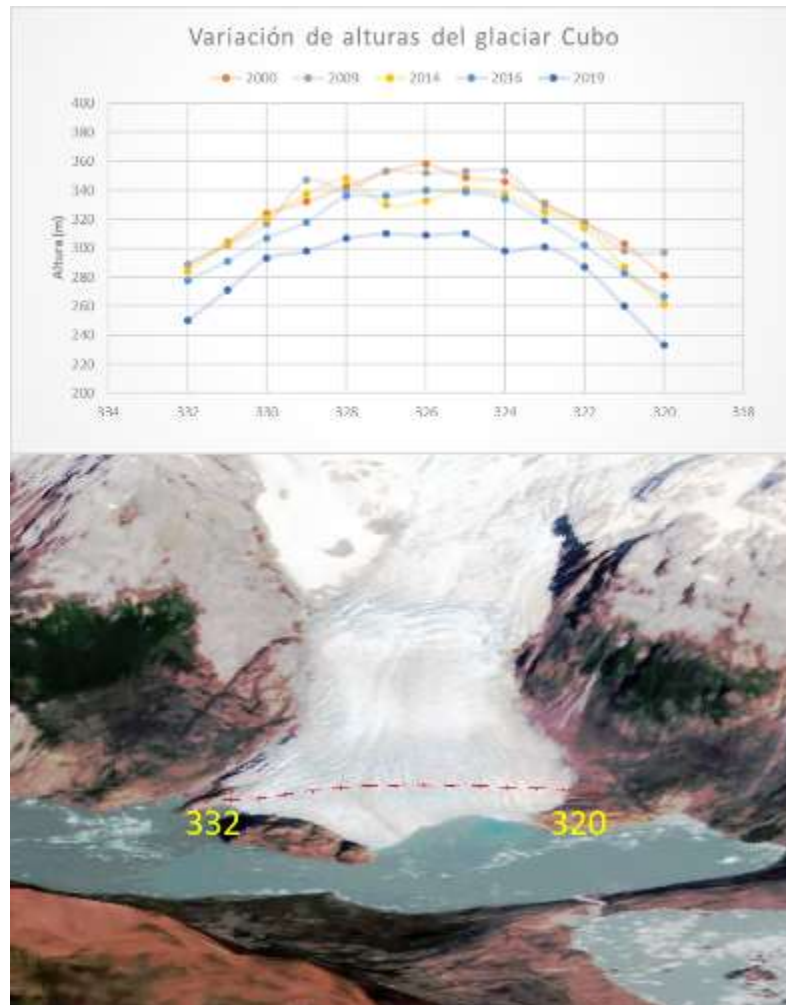


Fig. 11. Variación de alturas del frente del glaciar Cubo en los años de estudio y su correspondiente ubicación sobre el mismo.

Las imágenes utilizadas corresponden a un modelo en 3 dimensiones sobre una imagen Sentinel 2. Para las elevaciones se trabajó con el DEM SRTM, y en la modelización se hicieron observaciones desde el Cerro Daudet, punto panorámico aproximado de visualización con posición geográfica (S 50.77505 O 73.10254).

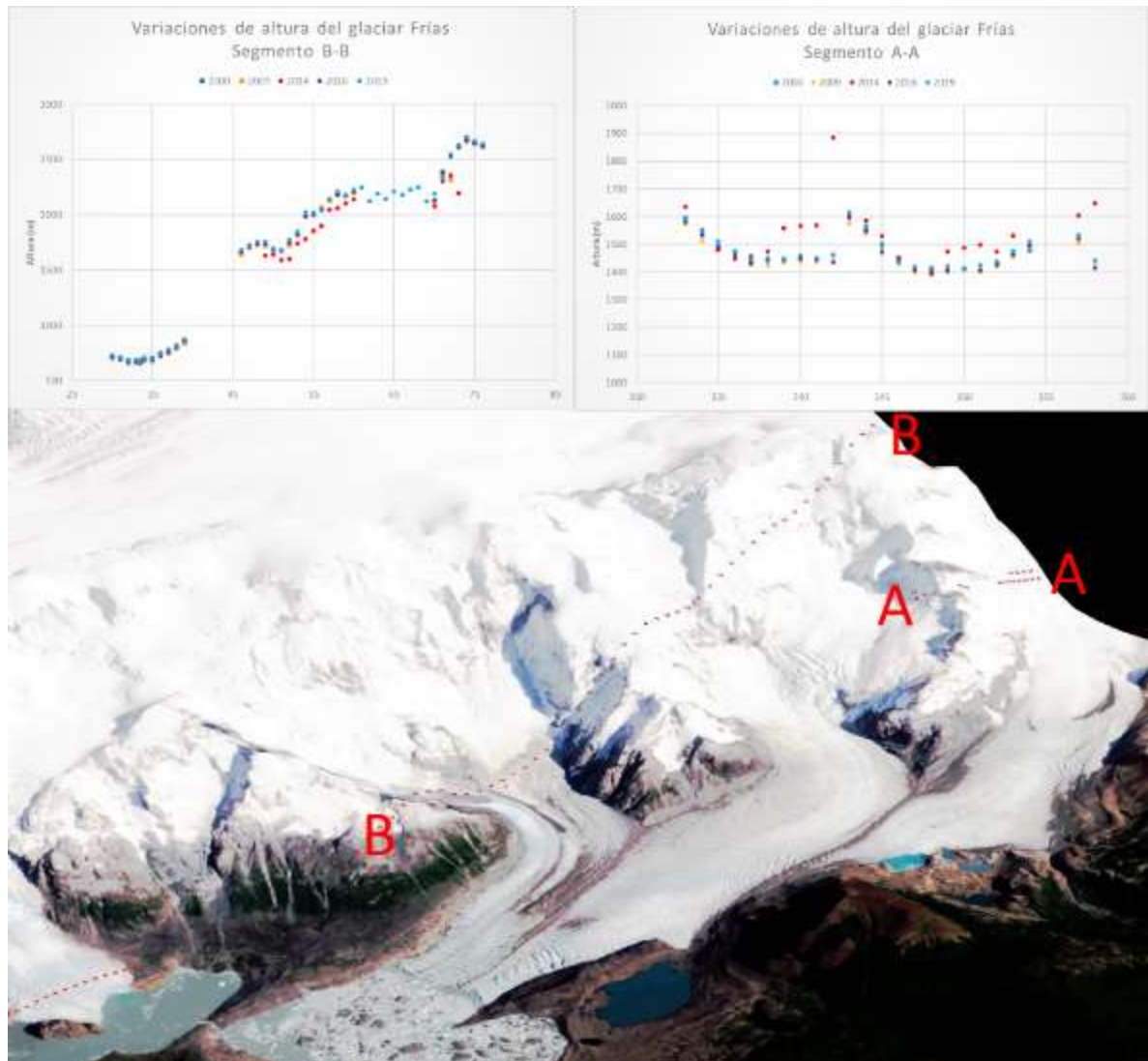


Fig. 12. Variación de alturas del frente del glaciar Frías en los años de estudio y su correspondiente ubicación sobre el mismo.



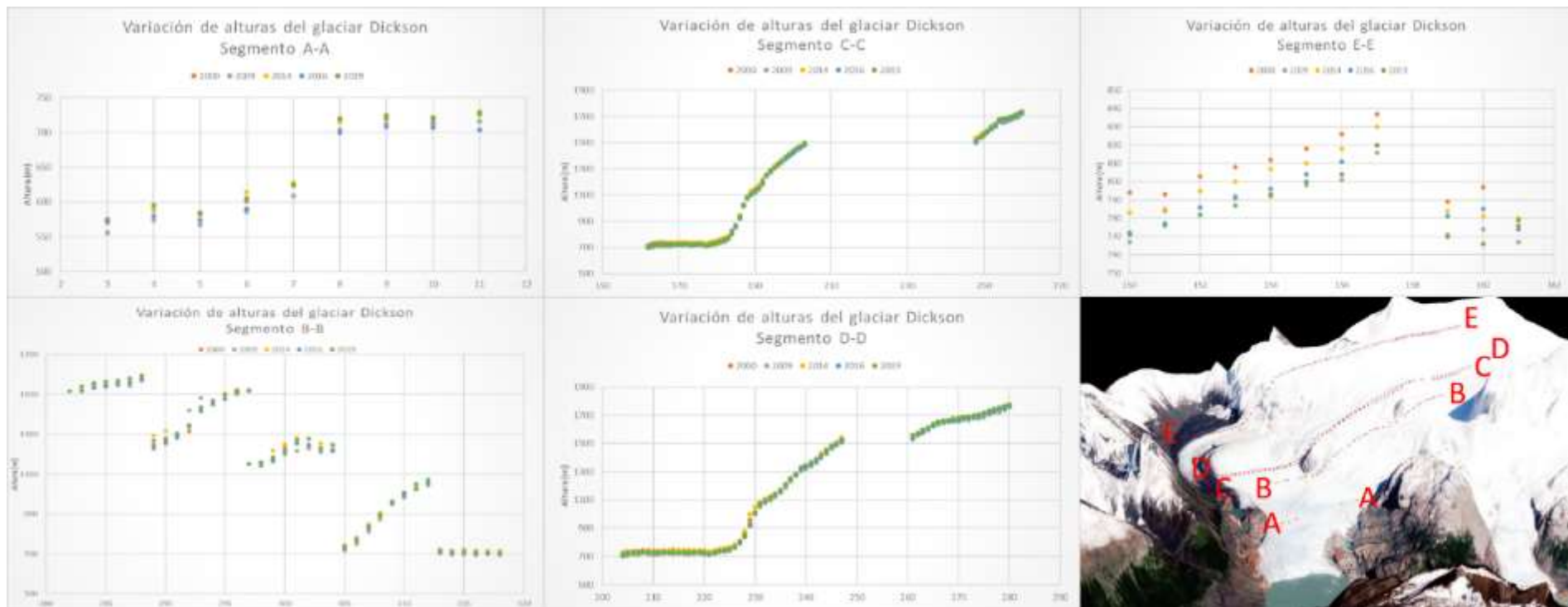


Fig. 13. Variación de alturas del frente del glaciar Dickson en los años de estudio y su correspondiente ubicación sobre el mismo.

### 3.3 OFFSET TRACKING

El glaciar Frías está formado por tres corrientes que se unen en una lengua que actualmente desemboca en el Lago Dickson. Ese hielo en movimiento con pendiente hacia abajo, circula hacia el lago con una velocidad determinada en el centro del glaciar, y otra en los bordes, aunque ninguna de ellas es uniforme. En el caso del glaciar Dickson, actualmente desciende del cerro Piedra Buena en una única corriente hacia el este, cuyo frente flota sobre las aguas del lago homónimo.

Para obtener un resultado que indique cómo el glaciar actúa en relación a su contexto, buscamos observar a través de la técnica de Offset tracking. El módulo de offset tracking busca patrones coincidentes en ambas imágenes dentro de un área determinada; la imagen a tiempo  $t$  se compara con la correspondiente imagen al cabo de un cierto intervalo de tiempo  $\Delta t$  y se calcula el valor de la correlación. Se asume que el desplazamiento medio del hielo corresponde al vector definido por la posición con máxima correlación. Se tomó como base de registro el DEM SRTM de 1 arcsec de manera de alinear los sub-píxeles de cada imagen y aproximar los corrimientos entre imágenes, para ello se definieron puntos en común entre *master/slave* para luego combinarlas mediante correlación. Luego, se estima el polinomio de corrección y se resampla la geometría de la imagen *slave* a la *master*.

Con el objetivo de analizar únicamente los píxeles correspondientes al hielo de ablación, se aplica una máscara que delimite el área de estudio y, a su vez, nos permita acortar los tiempos de procesamiento. Una forma de identificar el área de acumulación fácilmente con imágenes radar, es a través de una comparación de los niveles de retrodispersión de una imagen de invierno con una de verano. El radio de los valores de la imagen de referencia versus los valores de la imagen estival con menor cantidad de nieve, o nieve húmeda, se utiliza para detectar la disminución de la señal de retrodispersión debido a las áreas con derretimiento, separando de esta forma las superficies cubiertas de nieve de las libres. Así, se puede estimar la traza de la línea divisoria entre las superficies de acumulación y ablación de los glaciares (Fig. 14).

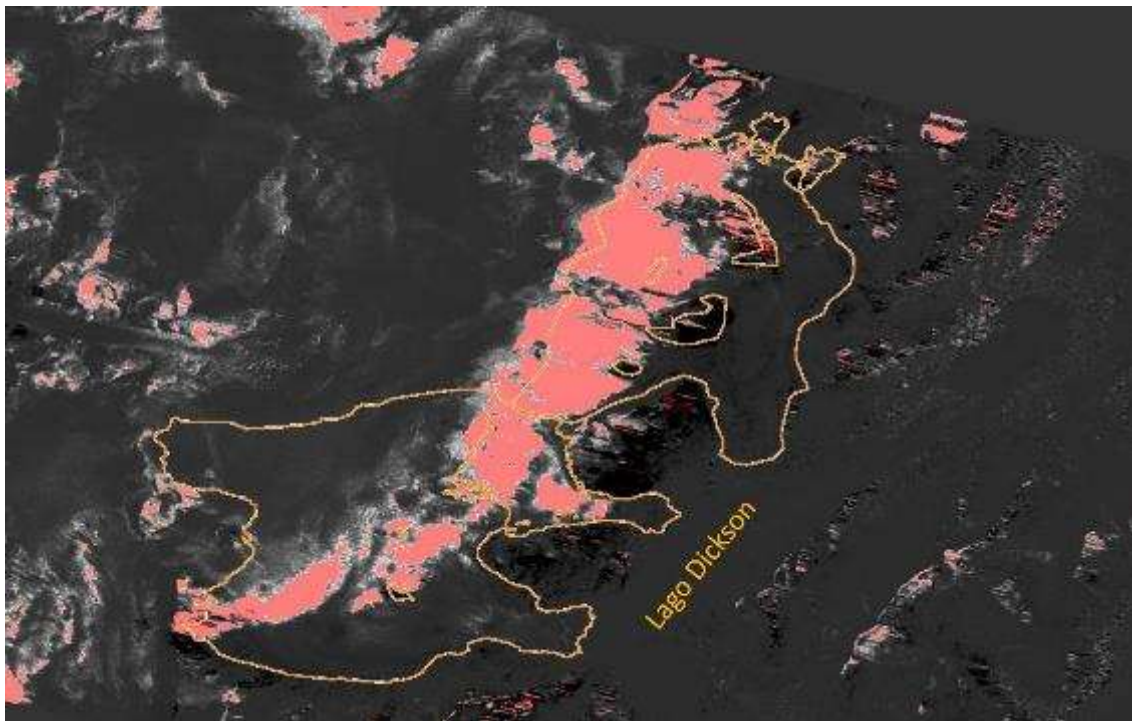


Fig. 14. Extracción de la zona de acumulación a partir de álgebra de bandas entre imágenes radar

Una vez obtenida la imagen georreferenciada, reproyectada y el área delimitada mediante una máscara, se realiza el análisis de offset tracking (Gari et al, 2018). Para el estudio consideramos una velocidad de referencia máxima de la zona de ablación del Glaciar Frías de 0.8 m/d (metros por día) y para el Glaciar Dickson de 0.3 m/d, para el período estival.

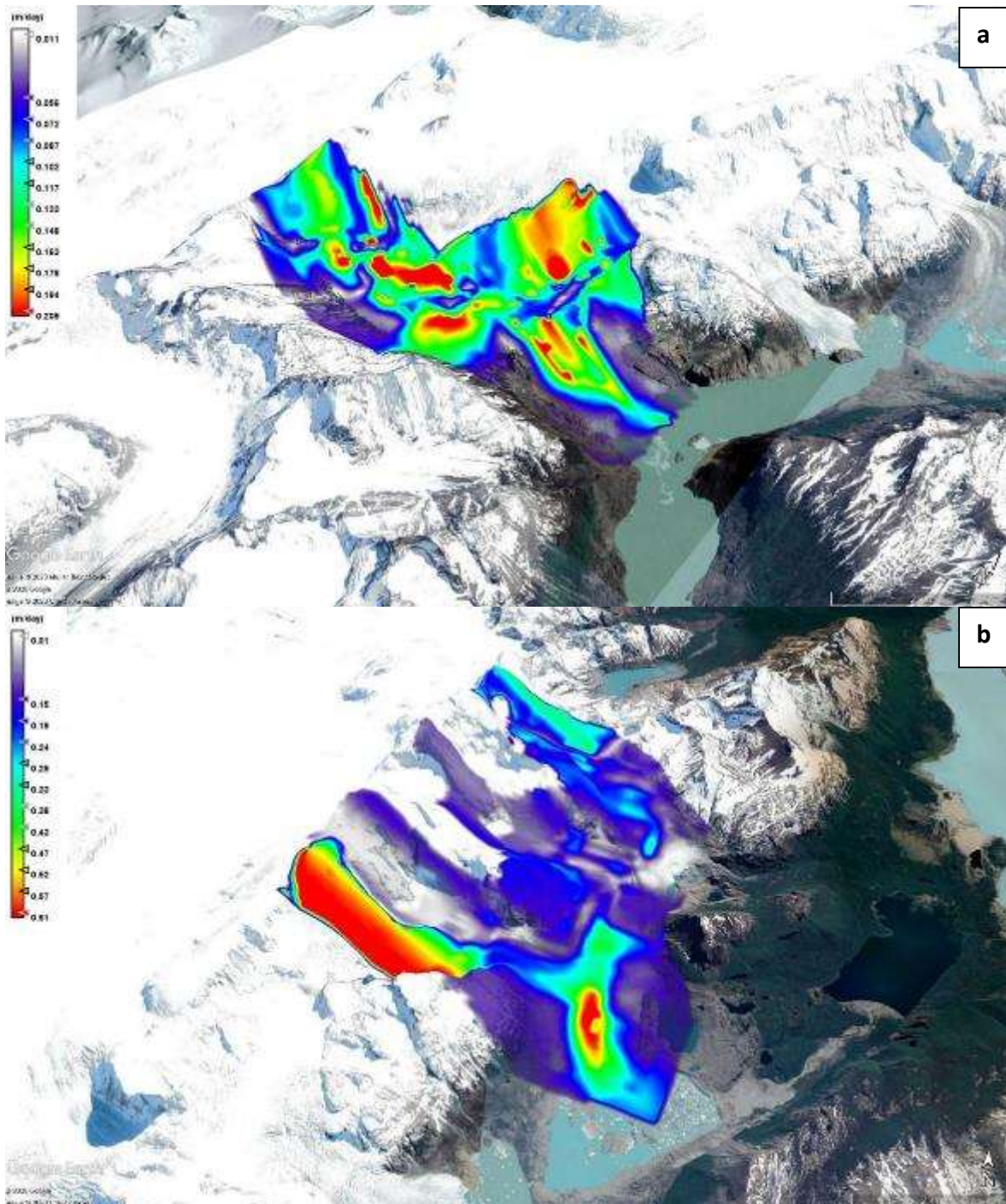


Fig. 15. Desplazamiento en la zona de ablación del glaciar Dickson (a) y glaciar Frías (b), febrero 2020.



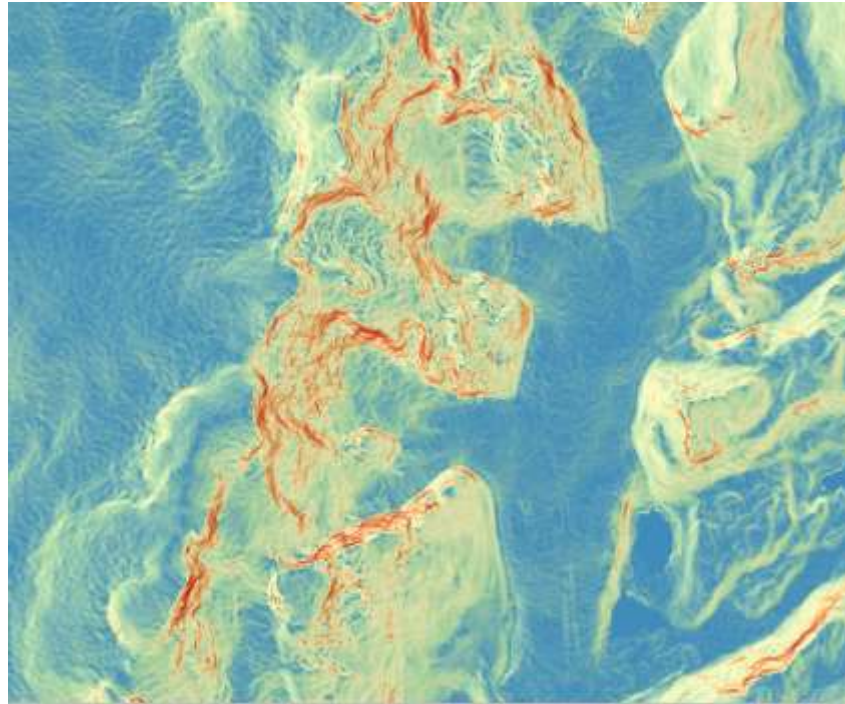


Fig. 16. Mapa de pendientes montado sobre uno de sombras en transparencia, del Glaciar Frías.

#### 4. CONCLUSIONES

Los tipos de datos seleccionados dependen de los objetivos y requisitos del trabajo como así también de su disponibilidad para el área de estudio. En este caso, la adquisición de las imágenes multitemporales de un mismo sensor no fue posible, siendo que el estudio analiza un periodo de más de 50 años. Por ello se utilizaron datos de diferentes misiones espaciales. Consecuentemente fue requisito previo efectuar las correcciones de las imágenes multitemporales y multisensores entre sí, tanto geométrica como atmosféricamente. El gran avance en la investigación científica del CHPS gracias al uso generalizado de imágenes satelitales ópticas y de radar permite, un monitoreo semipermanente de sus glaciares, el cálculo de velocidades del hielo con técnicas de seguimiento de patrones superficiales (feature tracking) y la construcción de modelos digitales de elevación así como estudios de balances de masa con modelos teóricos que se deben complementar con trabajos de campo. La necesidad de estos estudios ya fueron enunciadas hace más de 60 años por Lliboutry con las limitaciones técnicas de ese momento (Rivera, 2019).

Se observa una velocidad de retroceso con tendencia positiva, según el gráfico de la Figura 6, lo cual indica que en los próximos años el retroceso será más marcado. Esto va a depender también de las características del lecho rocoso, ya que se conoce que su topografía juega un papel importante en la estabilización del frente glacial. En los Glaciares Escondidos existe una tasa de retroceso elevada, la cual es probable que ocurra debido a que las lenguas glaciarias en todos los casos se encuentran aún en contacto con el lago Frías. Se observa que el glaciar Cubo permanece aún montado sobre la piedra que lo retiene en su frente, demostrando una vez más este comportamiento de retroceso limitado por la topografía. Debido particularmente a ese caso debería menguar el retroceso una vez que las lenguas glaciares abandonen la ribera del río y queden montadas por completo en tierra. Otra posibilidad que podría acentuar la regresión en la zona es que ocurra un deslizamiento basal sobre la pendiente de la ladera que obligue nuevamente a descender al glaciar, en cuyo caso perderían masa de hielo en el área de ablación, siendo éste uno de los ciclos de vida glacial más conocidos. Esto se evidencia además, por el hecho de que en la zona ya se



observaba anteriormente una gran cantidad de material morrénico, lo que demuestra que los glaciares han sufrido un importante adelgazamiento sobre todo en sus partes bajas.

Se observa un gran retroceso de forma volumétrica en toda la zona, dejando al descubierto nuevos cuerpos de agua y modificando de esta forma el flujo de las corrientes que, tal como se expuso en la introducción, primeramente fluía en dirección al lago Dickson, aportando aguas al océano Atlántico. El retroceso superficial del conjunto de estos tres glaciares es de algo más de 15 km<sup>2</sup>, como se indica en la Figura 7. Asimismo se puede concluir que los glaciares de esta área de estudio no están respondiendo a los cambios climáticos en forma lineal o directa, sino que sus comportamientos son mucho más complejos, con diferencias fuertes entre las cuencas de hielo, dependiendo de sus características dinámicas y topográficas (espesor y flujo del hielo).

La medición del error cuadrático medio obtenida entre puntos fijos nos acerca a la comprensión sobre la certeza del material que utilizamos. Siendo una metodología que provee de valiosa información al momento de conocer su exactitud, resulta necesario contar con una elevada cantidad de puntos, así como también la necesidad de eliminar los datos con correlación espuria; aplicados con cierto criterio. El error añadido por las nubes, alturas mayores a los puntos de picos máximos conocidas, o puntos sobre pendientes mayores a 10° podrían ser algunos factores a considerar. El RMSE obtenido entre los puntos de medición variable no fue considerado en este trabajo por no contar con mayor cantidad de puntos para realizar la correlación antes descrita.

En distintos lugares de la región estudiada la acumulación de hielo es más abundante que en otros. Debido al lecho y los laterales del valle que encausan al glaciar, es demorado su desplazamiento, donde de igual manera puede perderse volumen a causa de un aumento en el deslizamiento basal del frente. Esos efectos, combinados con factores climáticos provocan que la dinámica del glaciar a la hora de medir los puntos de elevación se torne más difícil de interpretar visualmente, porque el comportamiento no es totalmente uniforme.

Como parte de la técnica de Offset tracking aplicada, la respuesta sobre una masa rocosa en movimiento (como sedimentos y rocas de desprendimientos) es más precisa que la medida sobre el hielo o nieve, debido a que los sedimentos superficiales suelen ser un patrón que mantiene su forma relativamente constante en el tiempo. Las estructuras formadas en el hielo por el movimiento del glaciar sufren cambios a medida que este avanza. Las grietas y fracturas o seracs que se producen en el hielo son resultado de las grandes fuerzas de corte, tensión y compresión que el glaciar experimenta con el lecho rocoso, las pendientes y las laderas que lo encausan. Este es un método muy aplicado en los glaciares de escombros, por estar completamente cubiertos de esta materia. A partir de esta técnica, se puede apreciar que las zonas con pendientes más escarpadas (Fig 16) muestran una velocidad de desplazamiento mayor, como se ve en la Figura 15, en la corriente de alimentación sur del Frías. Este efecto también es notorio a simple vista al realizar un seguimiento visual de un depósito de detritos como muestra la Figura 8.

Como conclusión final se destaca la importancia del uso de estas tecnologías como fuente de información continua en estudios de monitoreo que debe ser complementada con información de relevamiento de campo.

## **5. BIBLIOGRAFÍA**

Agrimetsoft, 2019. RMSE. Recuperado de: [agrimetsoft.com/data-tool](http://agrimetsoft.com/data-tool)

Aniya, M., Sato, H., Naruse, R., Skvarca, P., y Casassa, G., 1996, "The Use of Satellite and Airborne Imagery to Inventory Outlet Glaciers of the Southern Patagonia Icefield, South America", Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 62, No. 12, pp. 1361-1369.

Bahr, D., Meier, M. y Peckham, S., 1997. "The physical basis of glacier volume-area scaling". Journal of Geophysical Research, Vol. 102, No. B9.

Bertone, M., 1997. "Aspectos Glaciológicos de la zona del Hielo Continental Patagónico". Edición del autor, 133 p., Buenos Aires.

Bertone, M., Gari, J., Sedeño, A., Tortolini, J., Sánchez, L., Gironelli, J., Hallak, Y., Ortone, A., 2007. Inventario y Estudio Multitemporal de los Glaciares del Hielo Continental Patagónico Sur. Presentado en el Seminario sobre Desarrollo Sustentable en Áreas Montañosas de los Países Andinos, organizado por CONAE, Mendoza.

Chinni, G., 2004. "Glaciares del Lago Argentino & El Chaltén, Del Perito Moreno al Marconi". Zagier & Urruty Publications, 160 p., Ushuaia, Argentina.

Comprehensive Remote Sensing, vol. 2, pp. 61–76. Oxford: Elsevier. 2018 Elsevier Inc.

De Agostini, A., 1945. Andes Patagónicos. Edición del autor, 2da edición, 437 p., Buenos Aires.

Risopatrón, Luis - Extraído de: c:File:18-peninsula-muñoz-gamero.jpg + c:File:17-isla-wellington.jpg, Dominio público, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=90181086>

Feruglio, E., 1944. "Estudios geológicos y glaciológicos en la región del Lago Argentino (Patagocia): (Expedición Alberto M. De Agostini 1930-31). Editor Academia Nacional de Ciencias, 255p.p. Argentina.

Gari, J., Ortone Lois, A., Fernandez Andronaco, D., Macote Yparraguirre, E., Pilato, G., 2015. "Estimación de características de los Glaciares Escondidos y del Glaciar Viedma a través de imágenes satelitales". Jornadas de Geotecnologías 2015, SELPER, Universidad de San Luis, Argentina.

Gari, Jorge Marcelo, Ortone Lois, Ailin Sol, Fernandez Andronaco, Daniel, Macote Yparraguirre, Erick Leonel, Cook, Luisina, Pilato, Guido Luis, Sedeño, Alicia. "Estimación del balance de masas del glaciar Upsala entre los años 1985 y 2016", publicado en actas del XVII Simposio Internacional SELPER noviembre 2016, Iguazú y IX Congreso Argentino de Tecnología Espacial CATE 2017 Córdoba 2017.

Gari, Jorge Marcelo, Ortone Lois, Ailin Sol, Fernandez Andronaco, Daniel, Macote Yparraguirre, Erick Leonel, Cook, Luisina, Pilato, Guido Luis, Sedeño, Alicia. "Estimación de la velocidad de desplazamiento del hielo en el Glaciar Upsala mediante imágenes SAR", publicado en IX Congreso Argentino de Cartografía, Buenos Aires Argentina, 2018.

Lliboutry, L., 1956. Nieves y glaciares de Chile, Fundamentos de Glaciología. Ediciones de la Universidad de Chile, 471 p., Chile. Fig 58.

Mateo Martinic B. "¿Un enigma histórico – geográfico resuelto? La intercomunicación de las cuencas hídricas del Paine y Lago Argentino". Magallania, (Chile), 2010. Vol. 38(2):27-40

Nasa, 2016. Mission. Recuperado de: [jpl.nasa.gov/srtm/mission.htm](http://jpl.nasa.gov/srtm/mission.htm)

Ortone Lois, A., Pilato, G., Gari, J., Macote Yparraguirre, E., Cook, L. 2019. "Representación topográfica mediante imágenes satelitales sobre el Campo de Hielo Patagónico Sur". CATE, CABA.

Rivera, A (2019). "Desafíos glaciológicos del Campo de Hielo Sur".

Rivera, A., Casassa, G (2004), "Ice elevation, areal and frontal changes of glaciers from National Park Torres del Paine, Southern Patagonian Icefield". Artic, Antarctic and Alpine Research, DOI: 10.1657/1523-0430.

Rott, H. "SAR Methods and Applications for Cryosphere Monitoring". ENVEO IT, Innsbruck & University of Innsbruck, Austria

Shrinidhi, A. y Kabindra, J., 2012. "Remote Sensing of Cryosphere". Mississippi State University. DOI: 10.5772/35194. USA

UNESCO. International Hydrological Programme e International Association of Cryospheric Sciences, 2011. "Glossary of Glacier Mass Balance and Related Terms". IHP-VII Technical Documents in Hydrology No. 86, IACS Contribution No. 2. París.

USGS, 2020, USGS EROS Archive - Declassified Satellite Imagery - 1. Recuperado de: [t.ly/rF6b](https://t.ly/rF6b)

