

# ESTIMACIÓN DEL BALANCE DE MASAS DEL GLACIAR UPSALA ENTRE LOS AÑOS 1985 Y 2016

Gari, Jorge Marcelo <sup>1,2</sup>, Ortone Lois, Ailin Sol <sup>1,2</sup>, Fernandez Andronaco, Daniel <sup>2</sup>, Macote Yparraguirre, Erick Leonel <sup>2</sup>, Cook, Luisina <sup>1</sup>, Pilato, Guido Luis <sup>2</sup>, Sedeño, Alicia <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Centro de Sensores Remotos – Fuerza Aérea Argentina.

Belisario Roldán 4511, 1425, CABA., ailin.ortone@gmail.com

<sup>2</sup> Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Haedo.

Paris 532, 1706 Haedo, Buenos Aires

<sup>3</sup> Fuerza Aérea Argentina, aamsed@yahoo.com

## RESUMEN

En el presente trabajo se estimó el balance de masa del Glaciar Upsala a través de imágenes satelitales. El mismo está ubicado en el Parque Nacional Los Glaciares en la provincia de Santa Cruz, corazón de la Patagonia Argentina y es el segundo glaciar más grande del país, aunque también el que más ha retrocedido en los últimos años. Se perfeccionó una metodología ya desarrollada en un anterior trabajo sobre el Glaciar Viedma, donde se determinaron características del glaciar tales como extensión de hielo, posición y altitud de la línea de nieve (ALN) en diferentes períodos, su relación con la línea de equilibrio (ELA), elevación sobre el terreno y posición del frente del glaciar, así como una estimación del cambio de volumen en el tiempo. Esta metodología permite realizar un cálculo aproximado del balance de masa del glaciar, determinado por la masa de nieve y hielo ganada en un ciclo. En ausencia de mediciones directas, se hace uso de métodos de percepción remota, a partir de imágenes satelitales ópticas de los satélites Landsat 5-TM y Landsat 8-OLI, modelos de elevación de terreno ASTER GDEM V2 y de la misión SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) ambos con un pixel de 30 m. y cartas topográficas. Asimismo, se utilizó una imagen radar en banda C del satélite Sentinel 1-A de la ESA, en donde se diferenciaron las zonas de ablación y acumulación del glaciar, utilizando de este modo imágenes todo tiempo en una zona con alta cobertura de nubes para estudios glaciológicos. Los resultados del balance fueron analizados considerando datos de temperatura y precipitación obtenidos de otras fuentes, estableciendo una relación entre los mismos y el área de hielo perdida durante el período de estudio. Paralelamente, se emplearon bases de datos de descarga gratuita y oficial (perteneciente al Instituto Geográfico Nacional) integrándolos con Sistemas de Información Geográfica (SIG). De esta forma, se generaron capas con información de puntos acotados, curvas de nivel y tablas de atributos de los glaciares que abarcan la zona de estudio.

Palabras Clave: glaciar Upsala – imágenes satelitales – balance de masa – monitoreo - SIG

## ABSTRACT

This paper reviews a remote sensing method for estimating mass balance of Upsala Glacier. This glacier is located in Los Glaciares National Park, Santa Cruz, in Patagonia and it is the second largest glacier in Argentina, though it has exhibited dramatic retreats in the last years. A former methodology used in Viedma glacier was improved, determining characteristics of the glacier such as ice extent, terminus position, the Snow Line Altitude (SLA) in different dates, the relationship with the Equilibrium Line (ELA) and estimation of volume changes in a specific

period of time. From this method, the change in local mass balance can be inferred according to ice and snow flow in a cycle. In absence of direct measurements, we apply remote sensing methods used in previous investigations. For this, we use optical Landsat 5-TM and Landsat 8-OLI images, digital elevation models ASTER GDEM V2 and SRTM Mission (Shuttle Radar Topography Mission), both with a 30 m. pixel size, and topographic charts. Mass balance measurements were analyzed taking into account temperature and rainfall data from many sources, establishing a relationship among them and glacial retreat over a specified period of time. At the same time, public and free GIS database (provided by Instituto Geográfico Nacional in Argentina) was embedded in a geographic data system, consisting of vector layers with altitude information, dimensional points, contour lines and feature tables of the glaciers within the area of interest.

**KEYWORDS:** Upsala glacier – remote sensing – mass balance – glacier monitoring - GIS

## INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, el balance de masas de un glaciar es evaluado con métodos glaciológicos directos que consisten en tomar mediciones en terreno determinando así su condición de equilibrio (Racoviteanu *et. al*, 2008). Dado que el área de estudio, salvo algunas excepciones, no cuenta con este tipo de mediciones, resulta esencial realizar alguna aproximación al balance de masas de los glaciares que ocupan esta región de importancia natural, hídrica y paisajística. Esto se logró mediante el uso de la teledetección. La utilización de imágenes satelitales permite recolectar información en sitios remotos como este, abarcando una gran superficie de análisis. Su uso se ha incrementado debido a una mayor disponibilidad de imágenes y a la ventaja de monitorear visualmente áreas de difícil acceso, lo cual implicaría un gran costo tanto en tiempo como de recursos económicos.

### Zona de estudio



*Fig. 1 – Ubicación del Parque Nacional Los Glaciares*

El PNLG está ubicado en el sudoeste de la provincia de Santa Cruz como se ve en la Fig. 1. Contiene los glaciares del Lago Argentino y Lago Viedma y forma parte del Hielo Patagónico

Sur (HPS), el cual cubre casi 7.300 km<sup>2</sup> desde los 48°20' de latitud S hasta los 51°30' de latitud S (Naruse y Aniya, 1995). Este se desarrolla a lo largo de la cordillera de Los Andes, con altitudes de 3400m y drena a través de glaciares temperados que pueden terminar en tierra, lagos proglaciares o fiordos. Mediante la integración de un GIS en la imagen Landsat correspondiente a febrero del 2016, se ubicaron los principales picos y glaciares de la zona (Fig. 2).

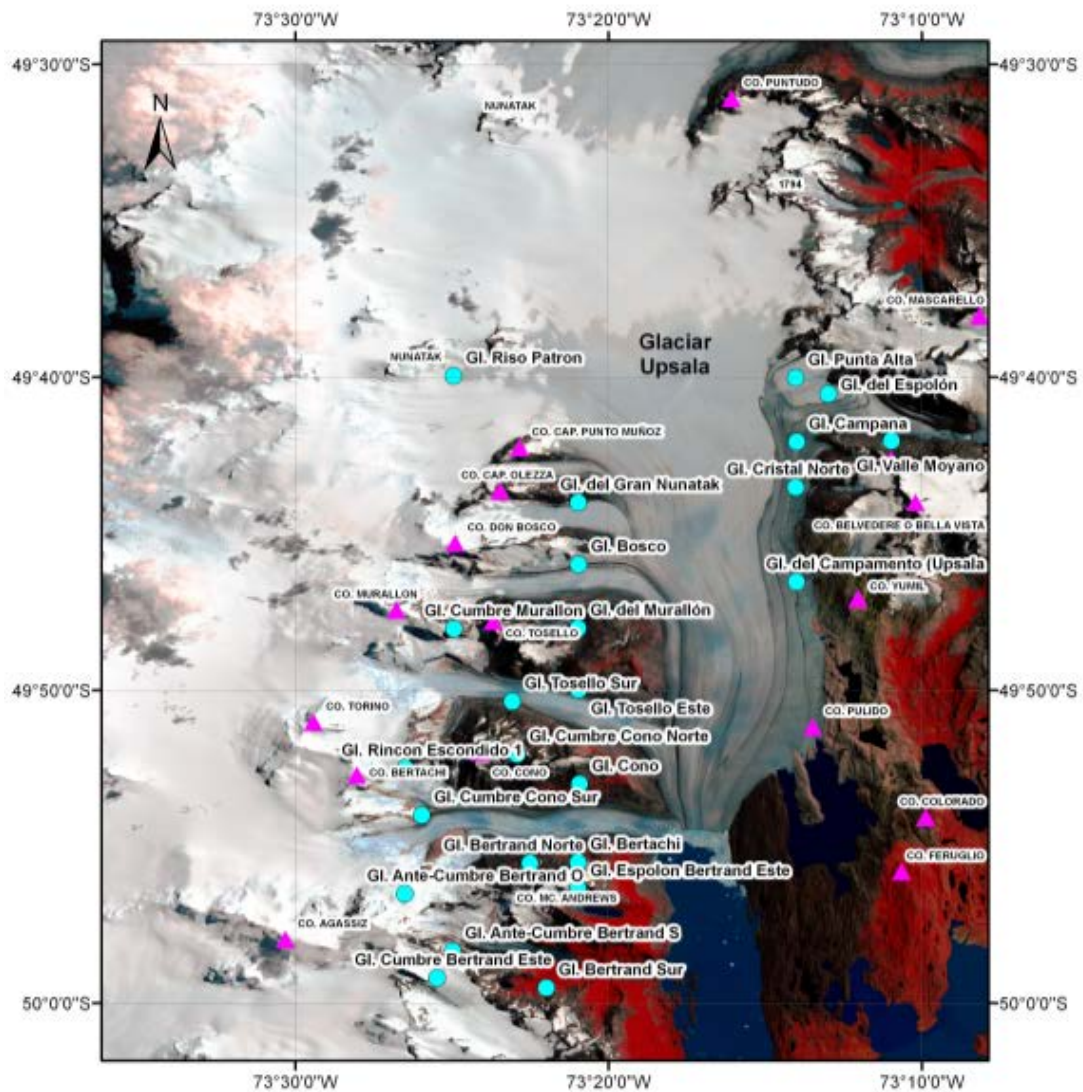
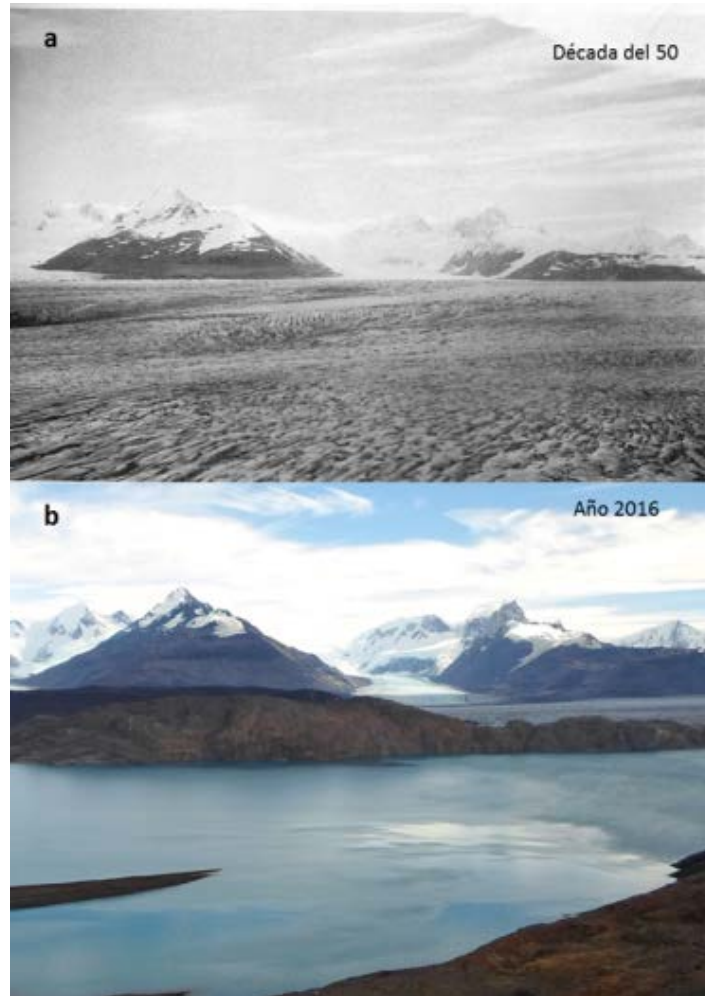


Fig. 2 – Ubicación de los principales glaciares y cerros en los alrededores del Upsala

El glaciar Upsala es el tercero en tamaño de Sudamérica, actualmente con más de 785 km<sup>2</sup>, donde 493 km<sup>2</sup> pertenecen al área de acumulación y 292 km<sup>2</sup> a ablación, según mediciones propias. Nace en el sector S. del cordón Mariano Moreno cercano al eje central de la cordillera de Los Andes y recibe los aportes occidentales de hielo proveniente de los glaciares Murallón, Tosello, Cono y Bertacchi, motivo por el cual se lo denomina de valle compuesto. En la margen izquierda se divide la lengua que termina en la laguna Guillermo. Tal como lo afirmaba Feruglio en la década del 40, el glaciar Upsala ha experimentado en los últimos decenios un notable retroceso y descenso de nivel (Fig. 3), según se puede ver en las morenas muy frescas situadas en ambas orillas del lago, por delante de su frente y la alta faja desnuda que se observa en la falda de las montañas que se levantan a su derecha (Feruglio, 1944).



*Fig. 3 – Glaciar Upsala en su parte inferior, visto desde el mirador sobre la laguna Guillermo frente al Cerro Cono. (a) Foto Ing. Bertone en la década del 50, (b) foto del autor, marzo 2016*

## **MATERIALES Y METODOS**

### **Imágenes ópticas**

Se buscaron imágenes ópticas de fines de la época estival, entre los meses de enero y abril. Según la disponibilidad de imágenes que pueden bajarse gratuitamente de internet, se seleccionaron las siguientes (Fig. 4):

- Imagen L5 TM de enero de 1985
- Imagen L5 TM de marzo de 1999
- Imagen LC8 OLI de febrero del 2016

Las imágenes se bajaron del sitio de la USGS U.S. Geological Survey (<http://glovis.usgs.gov/>). De esa misma página web pueden bajarse los modelos digitales de los sensores ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) y SRTM (Shuttle Radar Topography Mission).

Se considera ideal contar con imágenes del mismo mes o con la menor cobertura de nieve posible para identificar las áreas del glaciar. Esto se dificultó ya que debido a la posición geográfica de la zona, ésta se encuentra gran parte del año cubierta de nubosidad.

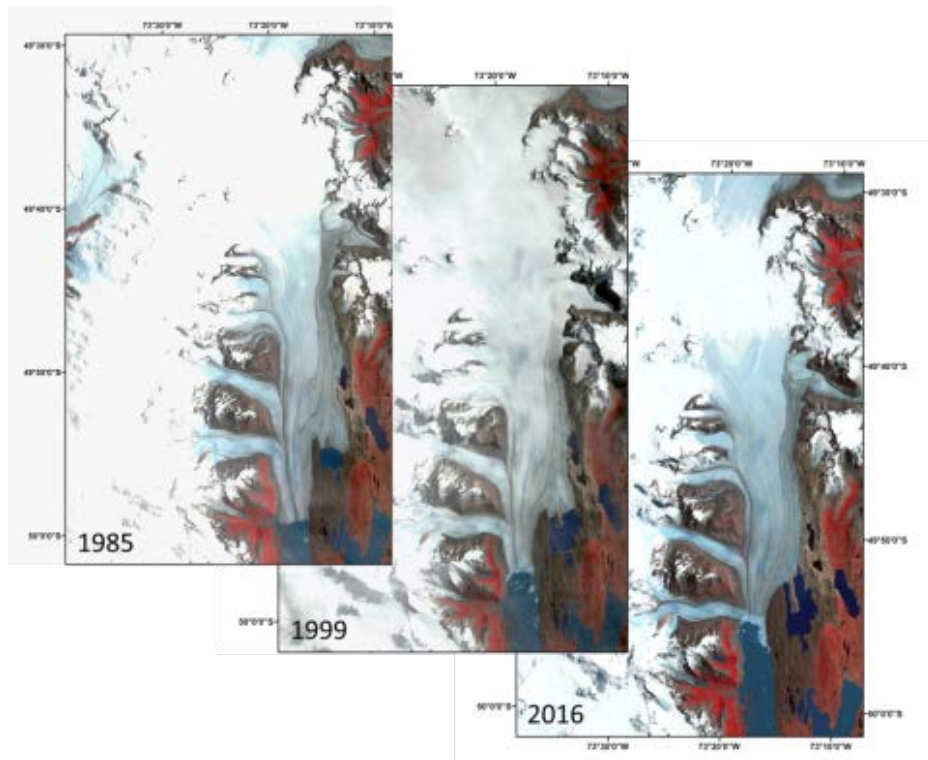


Fig. 4 – Imágenes, satélites Landsat 5TM y 8OLI, Glaciar Upsala de los años 1985-1999-2016

### Imagen radar

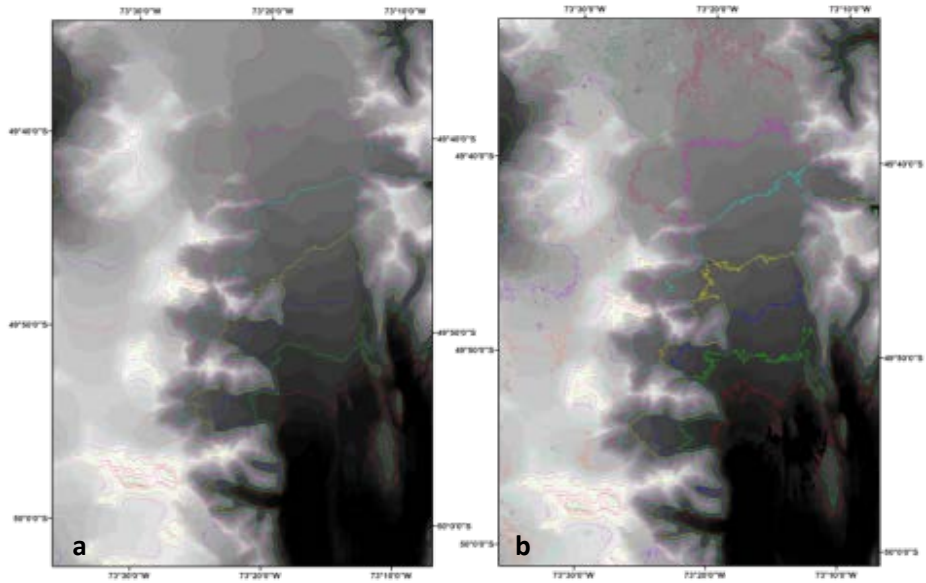
Se buscó una imagen de radar de apertura sintética de la zona del glaciar Upsala, de fecha cercana a la imagen Landsat 8 más reciente, disponible en forma gratuita en el banco de imágenes de internet *Sentinels Scientific Data Hub*, del programa europeo *Copernicus*, (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>)

- Imagen Sentinel 1A del 29 de febrero de 2016, en banda C, modo de adquisición IW, Level 1 GRD, polarización VV, tamaño de pixel 10 m.

### DEMs

A los efectos de medir las diferencias de alturas, se seleccionaron 2 modelos digitales de elevación con distintas fechas, las cuales se corresponden espacialmente con las imágenes Landsat (Fig. 5):

- *SRTM*: Shuttle Radar Topography Mission es un modelo digital de terreno de resolución de 3 segundos de arco por pixel (aproximadamente 90 metros) 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. (<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/mission.htm>)
- *ASTER GDEM V2*: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer - Global Digital Elevation Model Version 2, es un modelo digital de terreno desarrollado por la NASA y el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (METI), a bordo del satélite Terra lanzado en 1999, pero revisado y mejorado en la versión 2 anunciada en octubre del 2011, con un tamaño de pixel de 30m.

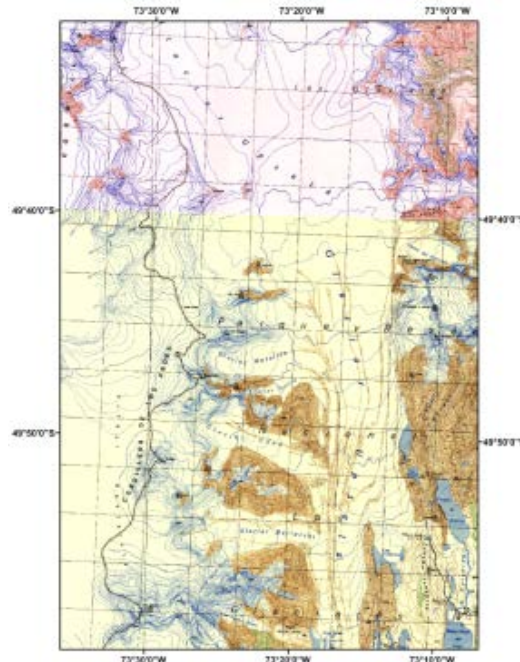


*Fig. 5 - Modelos digitales de elevación: (a) SRTM y (b) ASTER*

### **Cartas topográficas**

Se utilizaron dos cartas topográficas de escala 1:100000, cortesía del Instituto Geográfico Nacional, cuyo levantamiento se realizó en el año 1982 en proyección conforme Gauss-Krüger. Estas se unieron formando un mosaico que comprende la zona de acumulación y ablación del Upsala, como se ve en la Fig. 6.

- Carta topográfica Glaciar Viedma: hoja 4972-25 y 4975-30
- Carta topográfica Glaciar Upsala: hoja 4972-31 y 4975-36



*Fig. 6 - Mosaico de cartas topográficas del año 1982, mostrando el recorte del Glaciar Upsala*

### **Metodología**

Las imágenes Landsat, los DEMs y las cartas se convirtieron a un mismo sistema de proyección UTM WGS-84 Zona 18S. El mosaico de cartas fue registrado geográficamente con la imagen Landsat del año 85. Luego se realizaron los recortes de las zonas de interés a partir de un primer

recorte base y se midieron para cada imagen las áreas de ablación y acumulación. Para ello fue necesario el uso de herramientas que ayudan a delinear los límites glaciares y diferenciar zonas con características espectrales diferentes. Se trabajó con distintos cocientes de bandas ya que ayudan a mapear áreas con hielo limpio y hielo con detrito rocoso, diferenciándolas de áreas adyacentes (Fig. 7).

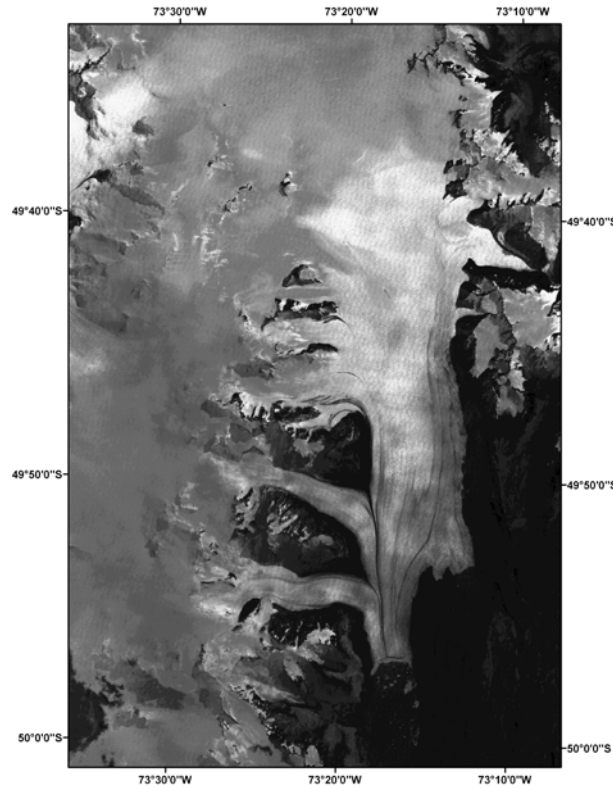


Fig. 7 – Cociente de bandas utilizado para delimitar zonas de ablación y acumulación. Imagen Landsat 5TM de marzo del 99: banda 4 (NIR) sobre banda 7 (SWIR)

Se calculó el índice NDSI (1) (Normalized Difference Snow Index) sobre las imágenes, el cual ayuda a separar nieve y hielo de áreas más oscuras como roca y suelo (Racoviteanu *et al.*, 2008; Shrinidhi y Kabindra, 2012), siendo

$$NDSI = \frac{(VIS-SWIR)}{(VIS+SWIR)} \quad (1)$$

A partir de estos resultados se aplicaron máscaras que dejan en evidencia solo las áreas de ablación y acumulación, enmascarando el resto de la imagen (Fig. 8). Por último, se transformaron estas máscaras a polígonos vectoriales para realizarles algunas correcciones manuales ya que quedaban fuera de la selección las morenas en la zona de acumulación por ser hielo cubierto de detritos.

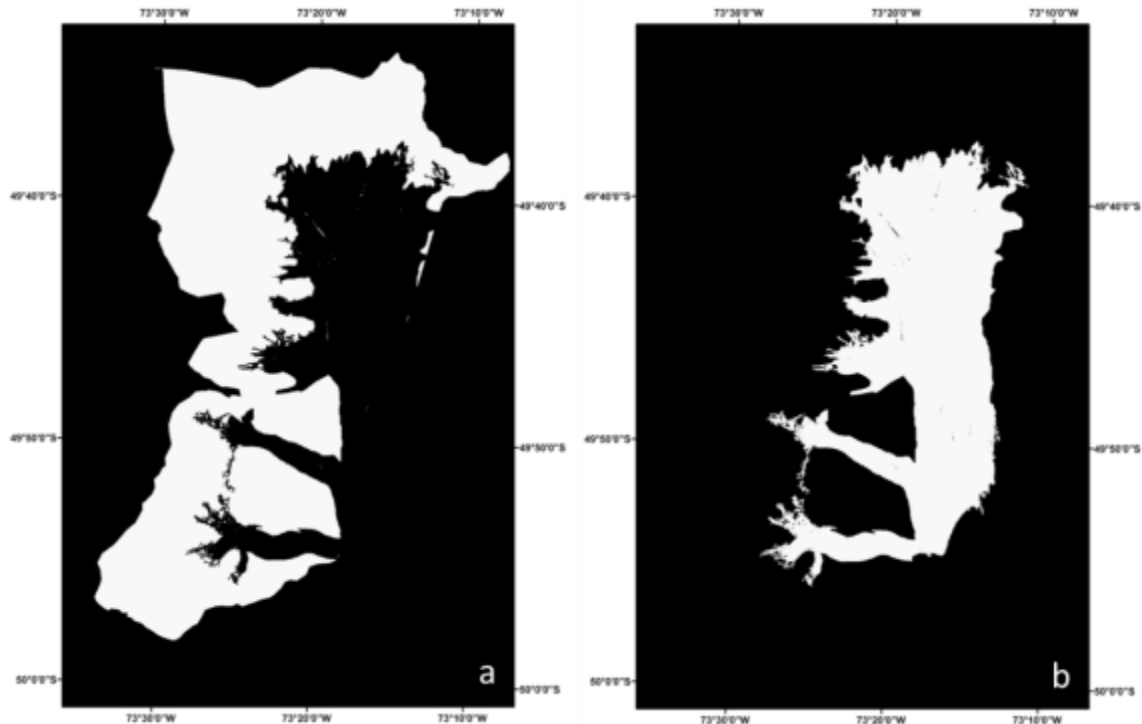


Fig. 8 – Máscaras de las zonas de acumulación (a) y ablación (b) del Upsala sobre la imagen Landsat 8OLI, febrero del 2016

De esta forma se pudo diferenciar la ubicación de la línea de nieve de fin del verano y su altura (ALN: Altitud de la Línea de Nieve), la cual es el límite inferior de la zona de acumulación y por ende donde empieza la zona de ablación. Se considera que la ALN está directamente relacionada a las variaciones del balance de masas de un glaciar y puede utilizarse para sustituir la línea de equilibrio (ELA) en glaciares templados (Rabatel *et al.*, 2008).

Para delimitar la zona de acumulación se trazó un polígono que comienza en su parte Este pasando por las cumbres del Cordón Moyano, siguiendo por el límite norte donde el glaciar comparte divisoria de aguas con el Viedma, cruzando parte del Altiplano Italia, pasando luego por las mayores alturas que marcan el Monte Don Bosco y los Cerros Murallón y Cono, y cerrando al sur por el Monte Roma y el Cerro Bertrand. Esto se realizó independientemente para cada imagen y su correspondiente DEM o cartas, ya que las alturas varían en los años.

Por otro lado, se trabajó con la imagen Sentinel para delimitar estas mismas áreas, ya que según Rau (2000) se pueden diferenciar las zonas de acumulación y ablación de un glaciar por su valor en decibeles. Los procesos realizados fueron: calibración (obtención del  $\sigma_0$ ), filtrado de speckle (refined Lee), corrección de terreno utilizando el DEM del SRTM, proyección UTM zona 18 S; se grabó la elevación de terreno en un canal asociado y se convirtió la imagen a decibeles. Luego, se marcó una máscara sobre el área total del glaciar, similar a la delimitada sobre la imagen Landsat, y además se tomaron muestras en las zonas de acumulación y ablación.

Una vez constatados los valores de separabilidad de las muestras, se realizó una clasificación con el método Paralelepípedo con desviación std. 2.0, además, se identificaron curvas de nivel en el área limítrofe entre ambas zonas, dentro de la cual se ubica la ELA (Fig. 9).



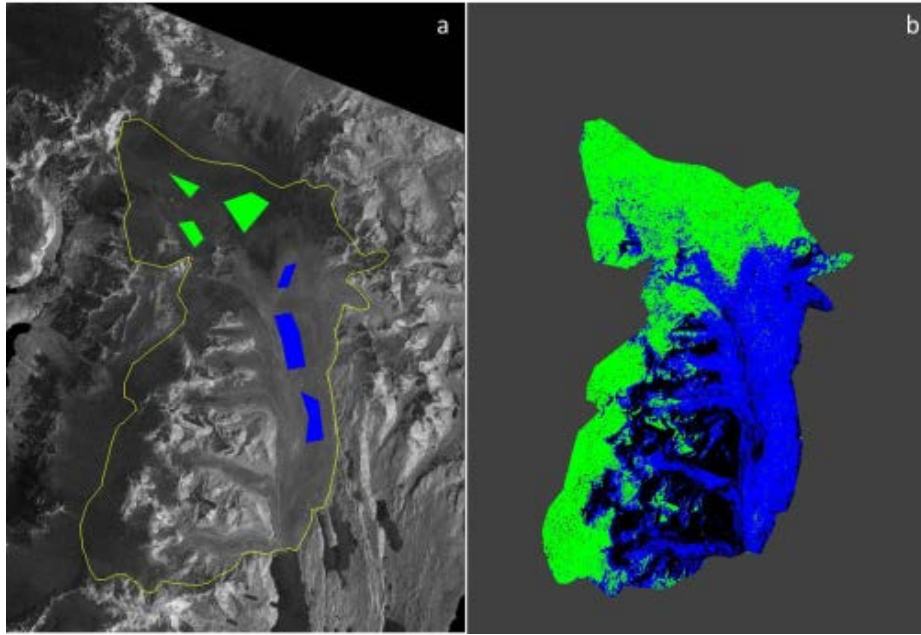


Fig. 9 - Máscara sobre la imagen Sentinel 1A y muestras de clases ablación y acumulación (a)  
Imagen clasificada (b)

Se observa que el área identificada como de ablación es de alrededor de 292 km<sup>2</sup>, semejante con las estimaciones realizadas con las imágenes ópticas y por otros métodos (Aniya *et. al.*, 1996). Sin embargo, quedan zonas no clasificadas, especialmente rocas o las morenas en la zona de ablación. La media en los datos obtenida en la zona de ablación fue de -14,87 db con una desviación standard de 1,28, lo cual coincide con los valores de retrodispersión de la ELA obtenidos por Rau (2000).

Teniendo ambas áreas delimitadas como se explicó anteriormente, se obtuvieron sus valores de superficie en km<sup>2</sup> (Fig. 10) y se calculó el índice AAR (Accumulation Area Ratio) que es el cociente entre las áreas de acumulación y total del glaciar en un período definido (2).

$$AAR = \frac{A_{sobreELA}}{A_{total}} \quad (2)$$

Este se encuentra entre 0 y 1 y se expresa generalmente en porcentaje (Bahr *et al.*, 1997; Kulkarni, 1992). Está relacionado asimismo con el balance de masa del glaciar siendo mayor su valor con balances positivos (UNESCO, 2011). Los valores obtenidos se encuentran dentro de los esperados para glaciares de estas latitudes (Kaser *et. al.*, 2003). Tanto el indicador AAR como la ALN, están relacionados con la tendencia del balance de masas de un glaciar, aunque se necesitarían varios estudios y mediciones para poder establecer una relación certera ya que depende de la situación geográfica de cada glaciar en particular (Kulkarni, 1992).

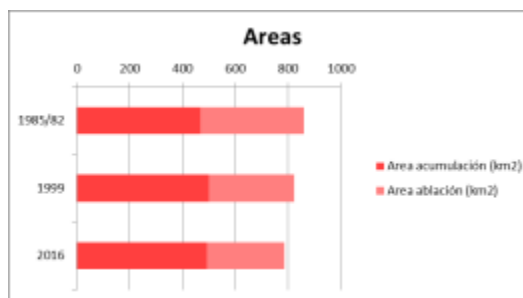


Fig. 10 – Diferencias en áreas de ablación y acumulación, y área total del glaciar

### Cálculo del Balance de masas a través del método geodésico

En ausencia de mediciones directas de campo, el balance de masas puede ser estimado usando un método indirecto (geodetic method en inglés) el cual consiste en medir cambios de elevación en el tiempo ( $\delta h/\delta t$ ) de varios DEMs representados sobre la superficie del glaciar. En nuestro caso contamos con dos modelos digitales de resolución comparable y los datos de altura de las cartas topográficas.

Para comenzar el cálculo del balance de masas, se midieron las alturas de distintos puntos característicos del glaciar. En la zona de ablación se tomaron alrededor de 30 puntos cercanos y por sobre la morena central, considerando aquellos que caen en agua en las imágenes más actuales debido al retroceso del glaciar (Fig. 11). En el gráfico aledaño se observa la disminución en el espesor del glaciar.

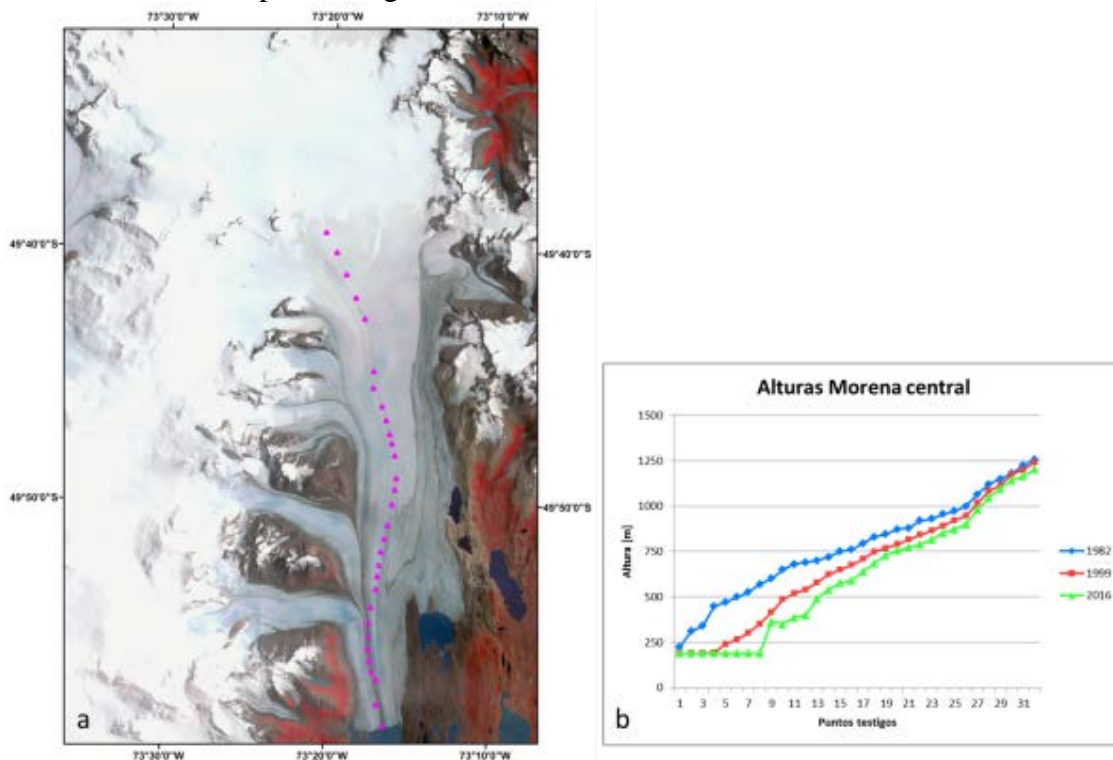


Fig. 11 – (a) Puntos de medición de alturas sobre la morena central sobre la imagen Landsat de 1985. (b) Alturas obtenidas para los tres años

Lo mismo se realizó sobre la Línea de Equilibrio y en la zona de acumulación tanto sobre la línea divisoria de aguas como en puntos aleatorios, obteniendo los resultados de balance que se presentan más adelante.

### Variables climáticas

La circunstancia que más influye sobre el extraordinario desarrollo de los glaciares patagónicos estriba en las bajas temperaturas estivales por el tiempo húmedo y nebuloso, lo cual reduce el límite de las nieves en la Cordillera Patagónica, siendo esta influencia quizás mayor que la de precipitaciones nevosas ya que son las que regulan el fenómeno de fusión del hielo y de la nieve (Feruglio, 1944). Durante la segunda mitad del siglo XX las temperaturas medias ambientales de los meses de verano (enero, febrero y marzo) toman valores entre 9,3 y 11,6 °C en un punto en la zona de ablación y entre 3,8 y 5,7 °C en un punto en la zona de acumulación del glaciar (Fuente WorldClim). En estos mismos puntos de control se registraron datos de temperaturas de suelo

provenientes de la constelación de satélites meteorológicos NOAA (National Oceanic & Atmospheric Administration), las cuales son descargadas en la estación terrena Mar Chiquita y procesadas por personal de la misma. Estos son datos puntuales, no promediados, de los últimos 10 años aproximadamente, los cuales son medidos directamente sobre la superficie del glaciar. Lamentablemente, no se cuenta con datos históricos de temperaturas y precipitaciones sobre las zonas de ablación y acumulación del glaciar pero si de las estaciones meteorológicas de El Calafate y el Lago Argentino, por lo que se pueden inferir tendencias de como varían estos parámetros sobre el glaciar. En primer lugar se observa que las precipitaciones en el lago han ido disminuyendo desde la década del 60 hasta la actualidad (Fig. 12).

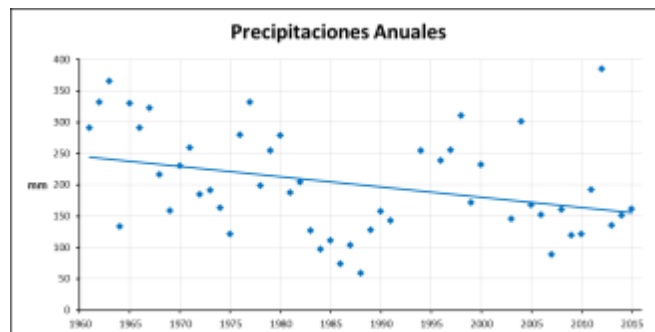


Fig. 12 – Datos de precipitaciones anuales sobre el Lago Argentino y alrededores

Siguiendo esta relación, la caída en el nivel de precipitaciones influye entonces de manera negativa en el balance de masas. Por otro lado, se observa que la temperatura media anual en la zona del lago ha disminuido levemente con el paso del tiempo. Sin embargo los resultados del análisis de balance muestran una gran fusión del hielo en la zona de ablación, lo que se relaciona con aumentos en la temperatura ambiente en cercanías de la misma. Por lo tanto, se decidió analizar datos de temperatura sobre el glaciar propiamente dicho, aunque en un menor periodo de tiempo mediante datos únicamente obtenidos de los satélites NOAA (Fig. 13).

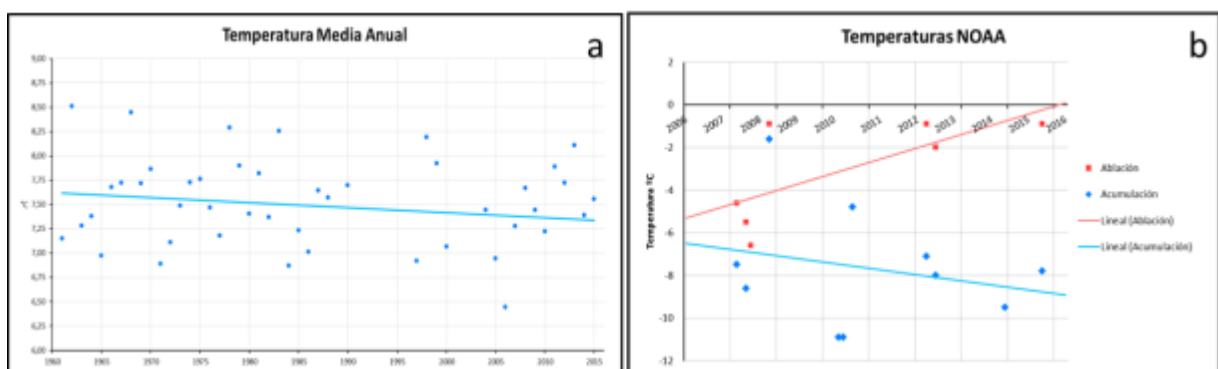


Fig. 13 – (a) Datos de temperatura media anual del Lago Argentino y alrededores. (b) Temperaturas de la superficie del glaciar de las zonas de ablación y acumulación entre los años 2007 y 2015

## RESULTADOS

El balance de masas del glaciar Upsala medido a partir de tres imágenes satelitales de los últimos 34 años es negativo, como puede verse en la Fig. 14. Esta tendencia se corrobora con mediciones de retroceso realizadas en imágenes Landsat de distintos años, sobre la morena central del glaciar. Las mayores velocidades de retroceso en esta zona del glaciar se dieron durante los años

2006 y 2011 como se aprecia en la Tabla 1, lo cual concuerda con un balance negativo más marcado. Desde el año 1982 hasta hoy, el glaciar retrocedió más de 8 Km en su frente medido sobre la morena central y la altura disminuyó unos 250 metros tomando el mismo punto testigo. Asimismo, el promedio de alturas ELA disminuyó en los años estudiados unos 100 metros aproximadamente.

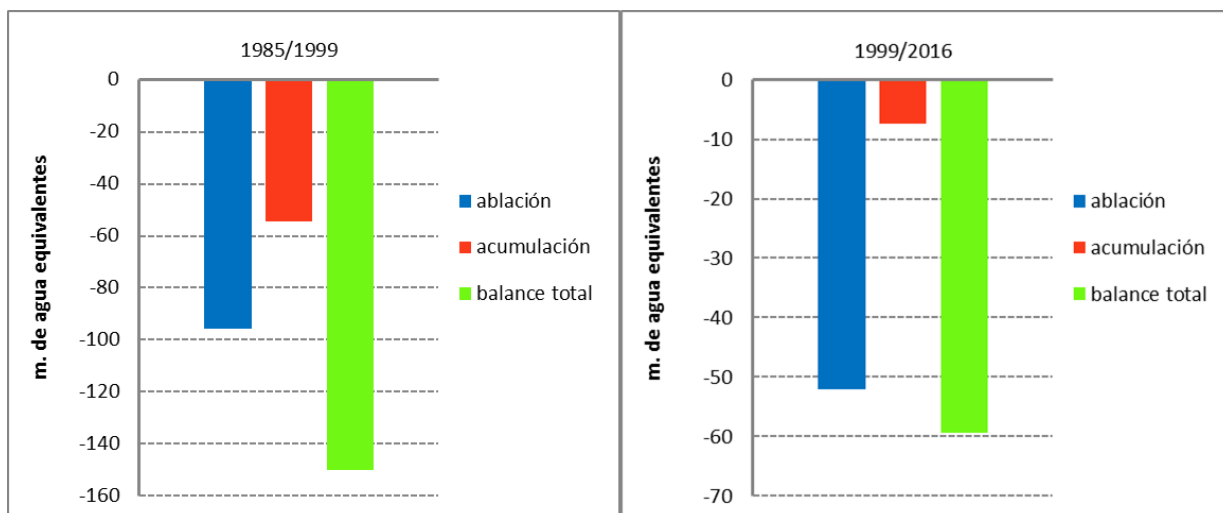


Fig. 14 – Balances de masa de los años 1985/99 y 1999/2016 del glaciar Upsala expresados en metros de agua equivalentes

Tabla 1 – Velocidad media de retroceso del glaciar Upsala durante los últimos 34 años medida sobre su morena central

Año	Velocidad Media de Retroceso [Km/año]
1985	
1986	0,197
1997	0,219
2004	0,225
2006	0,107
2011	0,702
2016	0,092

Se puede apreciar una directa relación entre la altura de ELA y el balance, siendo estas proporcionales, así como también con el radio AAR, el cual es inversamente proporcional al balance (Fig. 15).

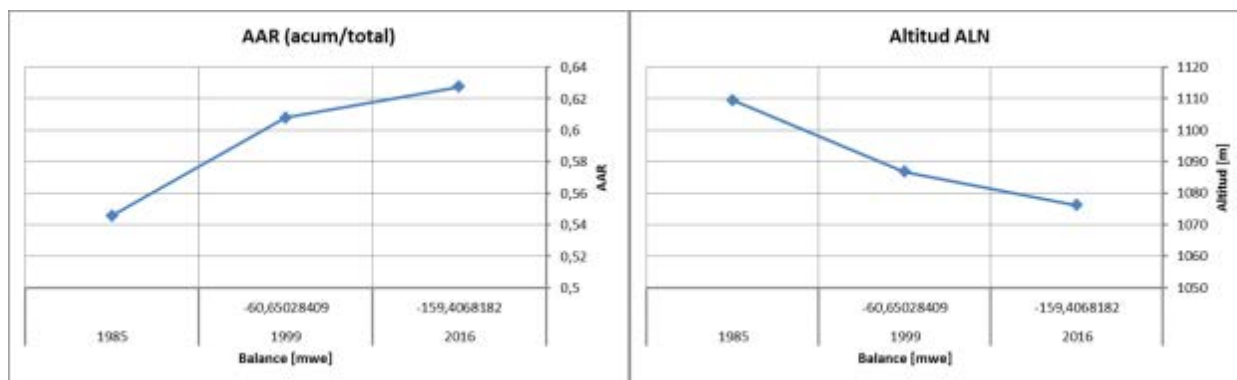


Fig. 15 – Gráfico comparativo del balance de masas con el radio AAR y la altura ALN. Se aprecia la directa relación entre ambos debido al balance negativo

## CONCLUSIONES

Aun siendo el balance siempre negativo y a pesar de que se mantiene una disminución del área total en los años, se nota que en los años estudiados hay un mayor retroceso del área de ablación y un leve aumento del área de acumulación. Este resultado puede derivar de nevadas ocasionales en las fechas de adquisición de las imágenes, lo cual debe tenerse en cuenta ya que las mediciones se hicieron en base a la ubicación visual de la Línea de Nieve. Se tendría un resultado más certero si se puede disponer de una mayor cantidad de imágenes, como también datos de campo a partir de mediciones sobre el glaciar.

Respecto a la relación ELA vs. Balance, la tendencia medida es contraria a la esperada para un glaciar con balance negativo, donde la altura de la Línea de Equilibrio, en este caso considerada como la Línea de Nieve, debería aumentar al mismo tiempo que disminuye la acumulación de nieve. Por ello, se debe tener en cuenta la hipótesis de considerar la ALN en representación de la ELA al fin de la época estival.

De igual forma, la relación AAR vs. Balance debería ser proporcional ya que se considera que si el balance baja, lo hace también el área de acumulación, pero no es el caso del presente estudio. Esto se explica porque a pesar de medir un aumento del área de acumulación en los años, se observa una disminución de alturas a lo largo de todo el glaciar muy significativa que deriva en resultados de balance de masas negativos. La altura en general del glaciar fue disminuyendo al pasar los años, la diferencia es mayor entre las décadas del 80/90 que del 90/2010 (el primer intervalo es de 17 años mientras que el segundo es de solo 12). Esto puede suceder porque la diferencia de años es mayor, si bien se conoce de experiencias en la zona que durante la segunda mitad de la década del 90, el retroceso de este glaciar fue muy marcado, perdiendo gran parte de su masa de hielo a los largo de la morena central y sobre el lago Guillermo. Esto podría explicarse mediante datos de precipitación y temperaturas sobre la zona de ablación.

Respecto al análisis climático de la región, se debe tener en cuenta que los datos de temperaturas ambientales y precipitaciones fueron tomados de estaciones meteorológicas que se encuentran a más de 80 km. En una zona geográfica donde las condiciones climáticas y ambientales varían de forma muy marcada a medida que uno se aleja de la cordillera.

La ALN es relativamente fácil de identificar en imágenes satelitales y guarda una buena correlación con la ALN medida en terreno según comparaciones hechas por Rabatel (2008). Sin embargo puede suceder que para algunos años el límite de la Línea de Nieve no coincida con aquel que se visualiza al final de la temporada estival debido a procesos meteorológicos locales

ocasionales (Rabatel *et. al.*, 2008). Se ha probado así también que los datos de retrodispersión de la imagen Sentinel 1A permiten diferenciar las zonas de ablación y de acumulación del glaciar, incluso visualmente. La banda C es una longitud de onda intermedia (6 cm.), la mayoría de los glaciares se ven rugosos en las bandas X y C, diferenciándose principalmente las morenas centrales en tonos más brillantes (Hall *et. al.*, 1998).

Es importante considerar los ángulos de incidencia al trabajar con una imagen radar en esta zona. El modo de adquisición IW tiene ángulos de incidencia mayores de 29° (entre 29° y 46°), por lo que no se observa un alto nivel de distorsión de acortamiento o inversión de laderas en la imagen. Se observan valores altos de retrodispersión en la zona de transición entre ablación y acumulación debido a que las capas de nieve y nieve compacta contribuyen a la retrodispersión volumétrica. Esto mismo sucede en la zona de ablación, donde también se ven tonos más claros debido a las grietas y canales de derretimiento presentes en los hielos desnudos, ya que la imagen es de fines de febrero. Por el contrario, en invierno se vería más brillante la zona de acumulación, debido a que la señal penetra (con poca absorción) en la nieve seca, y si la capa es gruesa habría mayor retrodispersión en los granos de nieve, pudiendo dar fuertes retornos. (Hall *et. al.*, 1998).

Se concluye finalmente que la incertidumbre al estimar los límites de las zonas de ablación y acumulación pueden surgir de diferentes fuentes de error como ser; la precisión de los DEMs y las cartas topográficas; la correlación de la imagen con el mosaico de cartas, cuyo error cuadrático medio es algo menos que 2 píxeles; el tamaño del pixel que para las imágenes Landsat es de 30 metros; la delimitación del polígono trazado manualmente; el hecho de contar con una sola imagen representativa del año en vez de una serie de imágenes de fin del verano a partir de las cuales se pueda estimar una altura de la Línea de Nieve promedio, lo que tendría mayor correlación con la Línea de Equilibrio del glaciar. Sumado a esto, no se tienen datos de campo como para poder verificar los resultados, lo cual es crucial ya que no existen muchos estudios sobre la relación existente entre la ALN y la Línea de Equilibrio en glaciares sobre estas latitudes y de este tamaño. Sin embargo, el método indirecto utilizado en el presente trabajo es un buen complemento para verificar futuros datos de terreno.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Ing. Alejandro Chichizola, del Instituto Geográfico Nacional, por su colaboración con las cartas topográficas y al personal de la estación receptora Mar Chiquita de la Fuerza Aérea Argentina.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- 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.

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

Davies, B. y Glasser, N., 2012. “Accelerating shrinkage of Patagonian glaciers from Little Ice Age to 2011”. *Journal of Glaciology*, Vol 58, No. 212, pp. 1063-1084(22).

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.

Geoestudios LTDA., 2008. “Manual de Glaciología”, Vol. 2. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, S.I.T. No. 167. Chile.

Hall D., 1998, “Remote sensing o Snow and Ice using Imaging Radar”, “Principles & Applications of Imaging Radar. Manual of Remote Sensing ,. 3ra Edición, Volumen 2. Editado por H. Henderson, A. Lewis. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, pp. 677-703.

<https://gis.ncdc.noaa.gov/maps/ncei/summaries/monthly>

<http://glovis.usgs.gov/>

<http://www.worldclim.org/>

<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/mission.htm>

Iturraspe, R., 2010. “Impacto del cambio climático sobre los glaciares de Tierra del Fuego y Santa Cruz”. Dir. Gral. de Recursos Hídricos, Secretaría de Desarrollo Sustentable y Ambiente de Tierra del Fuego.

Kulkarni, A., 1992. “Mass balance of Himalayan glaciers using AAR and ELA methods”. *Journal of Glaciology*, Vol. 38, No. 128.

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

Nimbus, gennaio-dicembre 1999. “Rivista della societa meteorológica italiana” ONLUS, Anno VII, N. 1/4

Rabatel, A., Bermejo, A., Loarte, E., Soruco, A., Gomez, J., Leonardini, G., Vincent, C., Sicart, J., 2012. “Can the snowline be used as an indicator of the equilibrium line and mass balance for glaciers in the outer tropics?”. *Journal of Glaciology*, Vol. 58, No. 212.

Rabatel, A., Dedieu, J., Thibert, E., Letréguilly, A. y Vincent, C., 2008. “25 years (1981-2005) of equilibrium-line altitude and mass-balance reconstruction on Glacier Blanc, French Alps, using remote-sensing methods and meteorological data”. *Journal of Glaciology*, Vol. 54, No. 185.

Racoviteanu, A., Williams, M. y Barry, R., 2008. “Optical Remote Sensing of Glacier Characteristics: A Review with focus on the Himalaya”. *Sensors* 2008, 8, 3355-3383; DOI: 10.3390/s8053355.

Rau F., Braun M., Friedrich M., Weber F. y Grossmann H., 2000. “Radar glacier zones and their boundaries as indicators of glacier mass balance and climatic variability”. *Proceedings of EARSeL-SIG-Workshop Land Ice and Snow, Dresden/FRG, June 16 – 17. Alemania.*

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.