

# CLASIFICACIÓN DE ESTRUCTURAS DE HIELO EN EL GLACIAR VIEDMA CON IMÁGENES SATELITALES ÓPTICAS Y DE RADAR

Gari, Jorge Marcelo  
Ortone Lois, Ailin Sol  
Cook, Luisina  
Sedeño, Alicia  
Macote Yparraguirre, Erick Leonel  
Fernandez Andronaco, Daniel  
Pilato, Guido Luis

## RESUMEN

La utilización de imágenes satelitales permite recolectar información en sitios remotos, abarcando una gran superficie de análisis y monitoreando visualmente áreas de difícil acceso, lo cual implicaría un gran costo tanto en tiempo como de recursos económicos. Esto es importante en una zona como la del Parque Nacional Los Glaciares en la provincia de Santa Cruz, donde se ubica el glaciar Viedma. A pesar de ser el mayor en tamaño del Parque Nacional, este glaciar ha sido muy poco estudiado, por lo que resulta esencial realizar algunas aproximaciones en materia de reconocimiento de su morfología y comportamiento, ya que ocupa una región de importancia natural, hídrica y paisajística. En el presente trabajo se buscó probar metodologías de estudio y clasificación de estructuras de hielo en el Glaciar Viedma combinando imágenes ópticas y de radar. Se estudió la capacidad de la imagen radar de la misión Sentinel 1A de la ESA (European Space Agency: Agencia Espacial Europea) en combinación con una imagen óptica del satélite SPOT 5 (Satellite Pour l'Observation de la Terre: Satélite Para la Observación de la Tierra), a partir de técnicas de procesamiento digitales que integran la información de ambas imágenes. Se destaca la importancia del uso de la tecnología radar como una ayuda invaluable para el estudio de zonas con características climáticas típicas de la Cordillera Patagónica, donde la mayor parte del tiempo se encuentra cubierto de nubes. Se evaluó de esta forma el aporte que ofrecen ambos sensores para definir y caracterizar los tipos de hielo y sus combinaciones con detritos rocosos, agua y nieve, que puede encontrarse en un glaciar de estas magnitudes, generando una cartografía temática de las unidades identificadas.

## PALABRAS CLAVE

Glaciar Viedma – SPOT – Sentinel – Clasificación – Bandas texturales

## ABSTRACT

Remote sensing approaches allow for regular monitoring in remote areas, with large coverage. The increased availability of imagery from these platforms allows extending the measurements of hardly accessible terrains, with low financial costs and longer time spans. This is of main interest in Parque Nacional Los Glaciares in Santa Cruz, where Viedma glacier is placed. Despite it is the greatest glacier in the National Park, it has been slightly investigated, consequently it is of paramount importance to start some approaches regarding its morphology and behavior, since it is located in a natural and enchanting scenery and it is hydric resource. In the following, we present the methodology for classifying ice structures in Viedma glacier working with optical and radar imagery. The capability of the combination of ESA Sentinel 1A radar image and SPOT 5 (Satellite Pour l'Observation de la Terre) optical image was studied. For this, digital processing techniques were applied, incorporating information from both images. We emphasize the importance of radar technology as a valuable support for the monitoring of landscapes with unstable weather, as typical in the Patagonian Cordillera, where most of the time the meteorological condition is cloudy. The contribution of both sensors was evaluated in order to define and characterize different sorts of ice, also combined with soil debris, water and snow, found in such glacier. As a result, we obtained a thematic map with the identified classes.

## KEY WORDS

Viedma glacier – SPOT – Sentinel – Classification – Texture analysis

## INTRODUCCION

La utilización de imágenes satelitales permite recolectar información en sitios remotos como es el Parque Nacional Los Glaciares, 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.

El sensoramiento remoto brinda una caracterización global del comportamiento glaciar, contrario al monitoreo in situ, siendo esta información útil para este trabajo, que pretende clasificar distintas morfologías del hielo abarcando un área extensa como es la zona de ablación del mayor glaciar del Parque Nacional. Esto comprende un desafío por tratarse de clases temáticas muy similares, con respuestas espectrales parecidas, donde se intenta clasificar hielo compacto, con y sin detritos rocosos, con y sin agua en superficie y con restos de nieve. Para ello se buscó utilizar las ventajas que ofrece una imagen radar al agregar canales de texturas radar a las bandas de la imagen óptica, trabajando de esta manera con mayor información de la cobertura que se estudia.

Se eligió este glaciar no solamente por contar con imágenes satelitales de la zona, sino también porque se conoce el área de anteriores tareas de campo y se cuenta con fotografías de las clases temáticas, lo que ayuda en gran parte a supervisar y validar los resultados de la clasificación. Sumado a esto, se puede afirmar que ya se han probado técnicas de clasificación en zonas montañosas utilizando combinaciones de bandas del espectro del óptico y el infrarrojo con bandas radar obteniendo resultados positivos, aunque sin pruebas en hielo.

Por otro lado, se desconoce mucho acerca de este glaciar, ya sea por su tamaño o dificultad de acceso, por lo que significa un gran aporte para el conocimiento y para futuras investigaciones.

## ZONA DE ESTUDIO

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 13.000 km<sup>2</sup> desde los 48°20' de latitud S hasta los 51°30' de latitud S (Aniya *et. al*, 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.

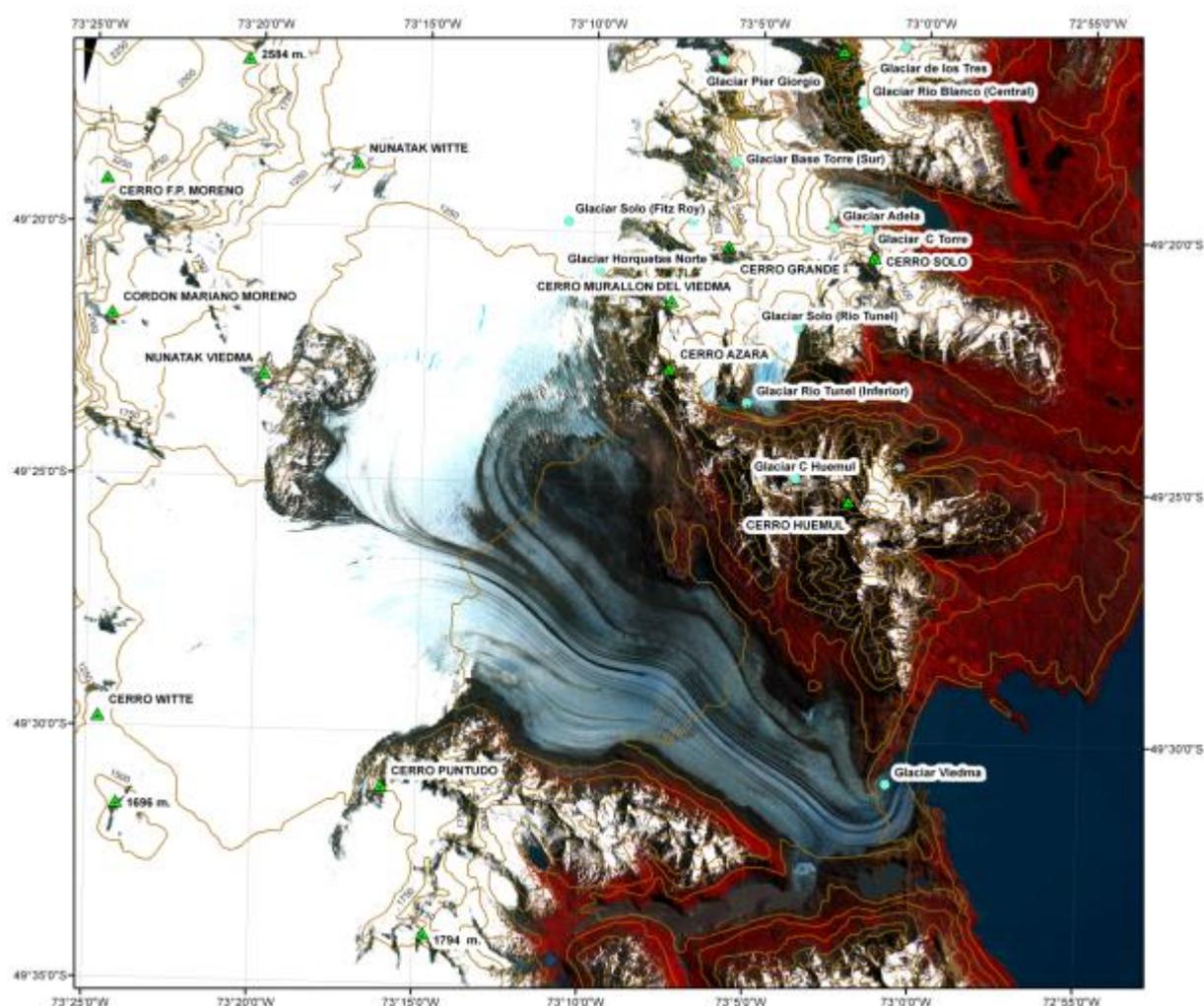


Fig. 1 – Ubicación del Parque Nacional Los Glaciares

## GLACIAR VIEDMA

Se encuentra en la parte norte del Parque Nacional Los Glaciares, en las proximidades de la localidad de El Chaltén (Fig. 2). Es el segundo más grande de Sudamérica y el mayor del PNLG con un área total de algo más de 1000 km<sup>2</sup> según mediciones propias, desemboca su lengua sobre el Lago Viedma y está formado por dos corrientes, una principal del NO, y otra desde el O, que se unen en las proximidades del Nunatak Viedma (Chinni, 2004). Nunatak es un término esquimal que significa tierras que emergen de los hielos, lo cual sucede al retroceder el hielo y dejar en descubierto las cimas de las que en un futuro serán montañas (Bertone, 1997).

Mediante la integración de un GIS en la imagen SPOT del año 2012 la cual será ampliamente utilizada en el presente trabajo, se ubicaron los principales picos y glaciares de las zonas aledañas al Viedma.

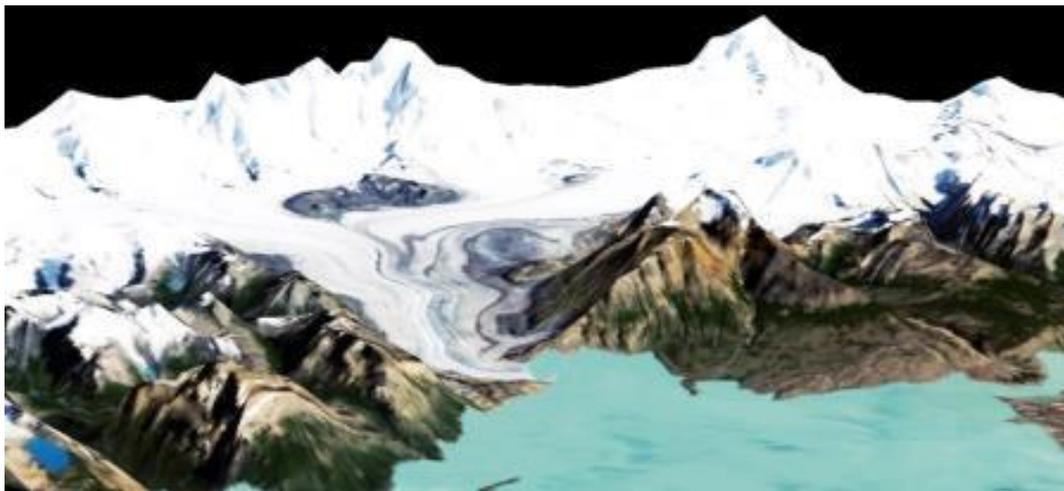


*Fig. 2 – Integración de información vectorial con la ubicación de los principales glaciares y cerros en los alrededores del glaciar Viedma*

Llibouty (1956) suministró algunos datos preliminares sobre este glaciar, aunque estimativos por la dificultad de delimitar su cuenca de alimentación. Esto se debe a que el glaciar nace en el seno del Campo de Hielo a partir de inmensas corrientes de hielo que dan origen en la periferia a anchos y caudalosos glaciares, para los cuales es casi imposible determinar la cuenca de alimentación. De la zona del Nunatak o Volcán Viedma fluyen tres franjas de cenizas volcánicas que se unen con la gran

morena central que baja por el glaciar. En su libro *Andes Patagónicos*, el Padre De Agostini escribía que en su paso por el glaciar en el verano de 1930/1931 se notaban evidentes señales de un reciente retroceso, indicadas por la desnudez y bordes romos de las rocas de los alrededores desprovistas de vegetación (De Agostini, 1945).

El análisis de los datos de trabajos más recientes permite concluir que el glaciar Viedma presenta una notable estabilidad del frente principal, en contraste con la mayoría de los glaciares restantes del HPS. Sin embargo, se han detectado cambios significativos en la margen sur del glaciar. Chinni (2004) estima que desde 1968 hasta 2001 perdió, tanto en su frente como en su margen sur hasta laguna Viedma, un total de 3,6 km<sup>2</sup>, de los cuales 2,2 km<sup>2</sup> corresponden a retroceso en agua y el resto en tierra. Según mediciones propias de balance de masas, desde el año 1985 al 2014 el glaciar presenta un balance negativo de más de 500 metros de agua equivalente (Gari *et. al*, 2015).



*Fig. 3 - Modelo tridimensional del glaciar Viedma con una imagen Landsat color natural, año 2014, las líneas oscuras sobre la superficie de ablación son las denominadas morenas del glaciar*

La forma de alimentación del Viedma es por precipitación nival y por la acumulación de nieves eternas del campo de hielo. Es un glaciar temperado que posee gran cantidad de morenas bastante notorias en su zona de ablación, las cuales se pueden divisar fácilmente en las imágenes (Fig. 3). Las centrales provienen principalmente de cordón montañoso Mariano Moreno y del Nunatak Viedma y se van uniendo a medida que descienden por la lengua glacial. Las laterales en cambio provienen de los cerros Huemul en su parte norte y Mascarello en la zona sur. No obstante también podría comprender morrenas terminales que ya no están en contacto con el hielo y que fueron formadas a medida que el glaciar fue retrocediendo y alimentando la cuenca del Lago Viedma, pero esto no es posible de saber sin conocimiento de las profundidades del fondo lacustre ya que estas morrenas, en caso de existir, se encontrarían bajo el nivel del lago (Fig. 4).



*Fig. 4 – Frente del glaciar Viedma. Fotografía del autor, diciembre del 2011, las franjas negras en el hielo son detritos pertenecientes a la morena central*

## **MATERIALES**

A pesar de haber trabajado anteriormente con imágenes Landsat, éstas poseen una resolución espacial media que no es suficiente como para diferenciar estructuras en el hielo muy heterogéneas y de pocos metros. Por ende se optó por utilizar una imagen SPOT 5 provista por la CONAE cuya resolución es más adecuada para tal fin.

Asimismo, se eligió una imagen radar Sentinel 1-A de noviembre del 2014, ya que éstas son las únicas imágenes radar de descarga gratuita disponibles. Además, tienen la ventaja de tener el mismo tamaño de pixel que la imagen óptica SPOT utilizada, ambas de 10m. La fecha elegida es la más antigua disponible, ya que el satélite Sentinel 1-A fue lanzado en abril del 2014.

- Imagen óptica del satélite SPOT 5 del 12 de noviembre del 2012, tipo de producto 1J, multispectral de 10m de pixel (Fig. 5a).
- Imagen radar del satélite Sentinel 1-A, producto IW (Interferometric Wide Swath) Level 1 en Banda C, de 10m de pixel (Fig. 5b).

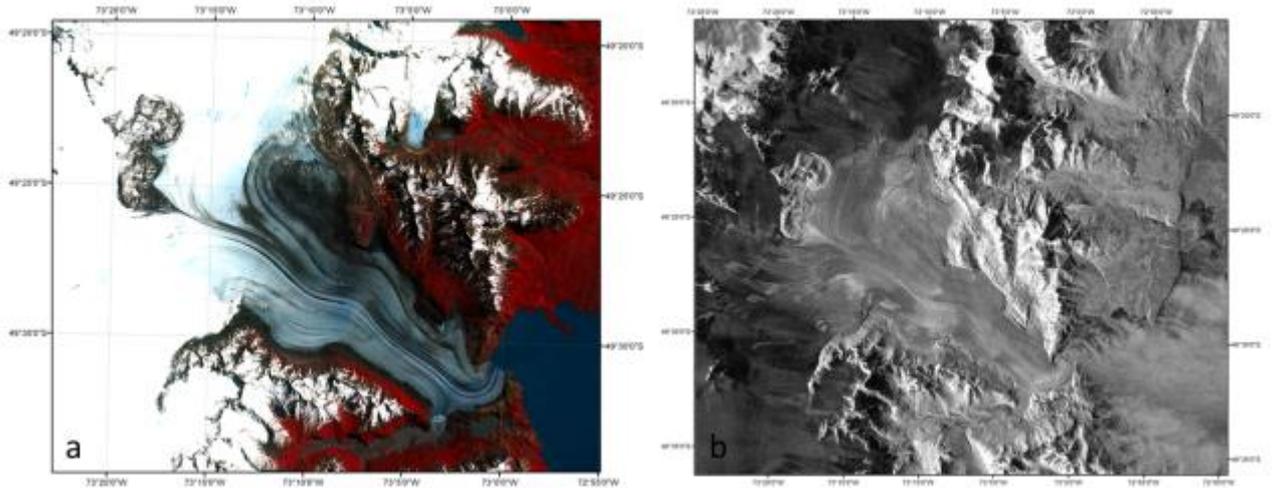


Fig. 5 – Imágenes satelitales de la zona de ablación del glaciar Viedma: (a) imagen óptica SPOT 5 y (b) imagen radar Sentinel 1-A.

## METODOLOGÍA

Las imágenes se convirtieron a un mismo sistema de proyección UTM WGS-84 Zona 18S, ya que representa las menores distorsiones y luego se recortaron las zonas de interés a partir de un primer recorte base.

Primeramente, se realizó en la imagen óptica una máscara de la zona de ablación del glaciar, dentro de la cual se realizaron las clasificaciones. 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 el cociente de bandas B3/B1 (IRC/VIS) y el índice NDSI (1) (Normalized Difference Snow Index), ya que ayudan a mapear áreas con hielo limpio y hielo con detrito rocoso, diferenciándolas de áreas adyacentes (Racoviteanu et al., 2008; Shrinidhi y Kabindra, 2012) (Fig. 6), siendo

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

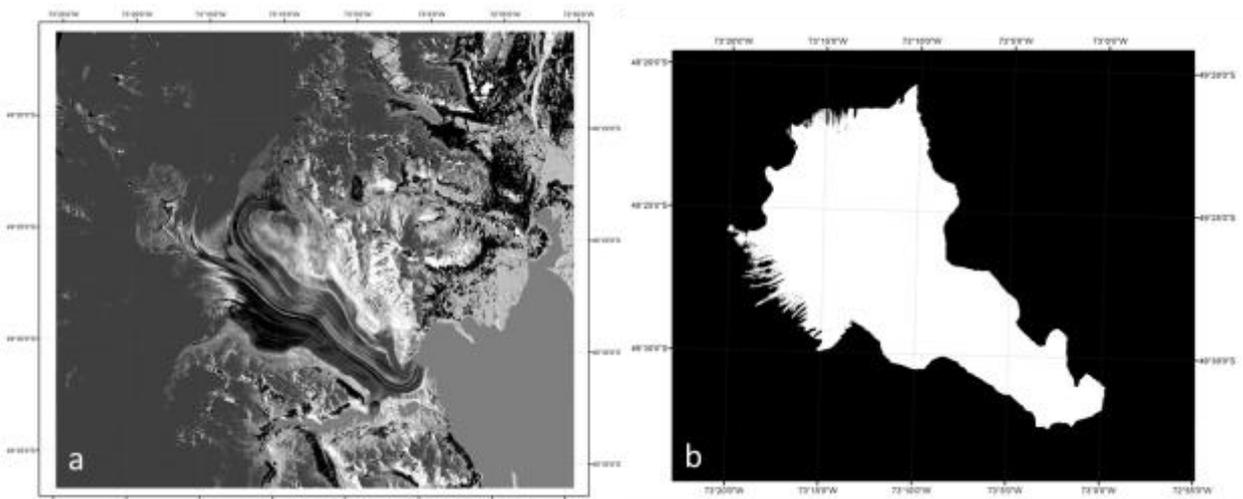


Fig. 6 – Límites de la zona de ablación: (a) índice NDSI y (b) máscara obtenida

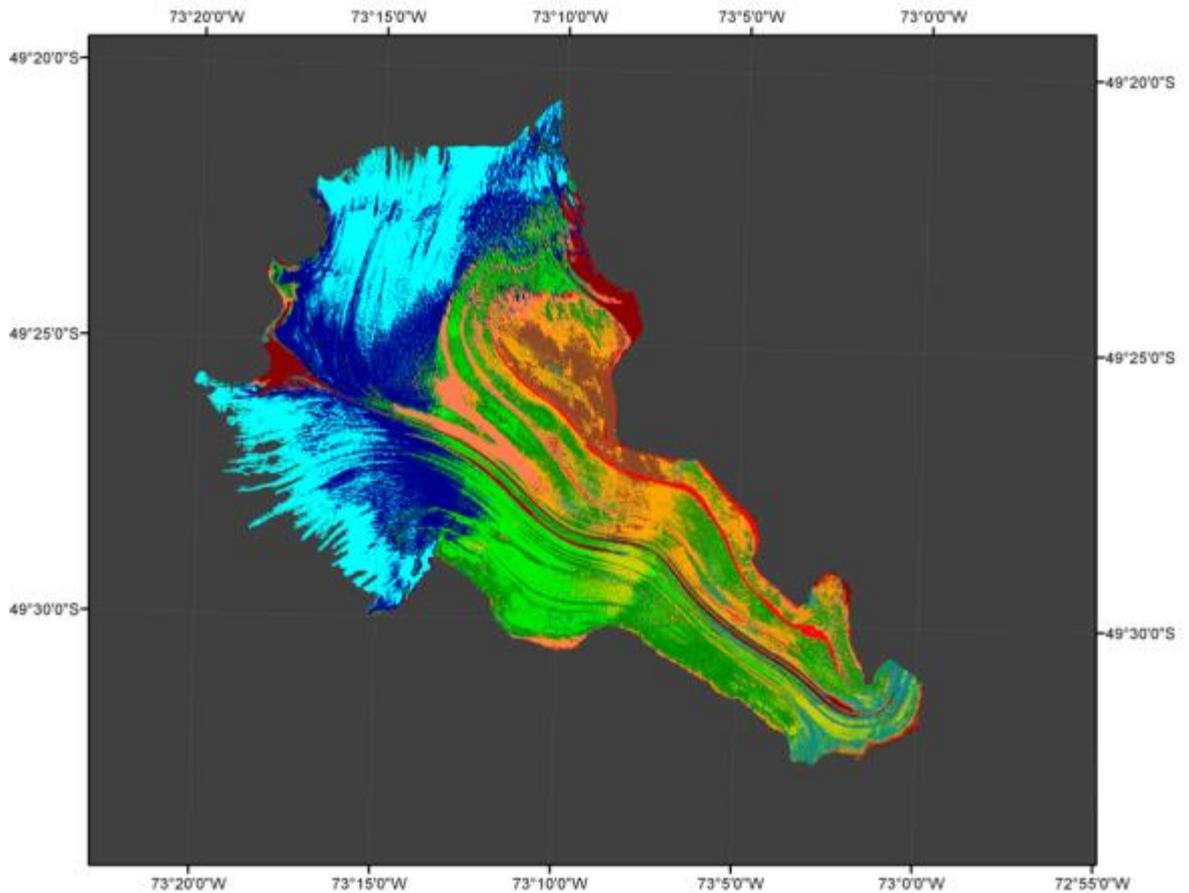
Como paso siguiente se realizó una clasificación no supervisada con el método *k-means* utilizando la máscara creada, siendo ésta una primera aproximación a la diferenciación de las distintas clases de hielo. Una clasificación no supervisada asume que los valores digitales de la imagen forman una serie de agrupaciones de píxeles con un comportamiento espectral homogéneo y que, por lo tanto,

deberían definir clases temáticas de interés (Riveira; 2012). En el método *k-means* los píxeles se agrupan en una cantidad K de clases, de manera que cada uno pertenece a aquella cuyo centroide es más cercano al mismo. Luego de una primera asignación de píxeles en las clases iniciales, se vuelven a calcular las medias de cada clase y se reasignan los píxeles en estas de acuerdo al nuevo cálculo. Estos dos últimos procesos se actualizan iterativamente hasta que se alcanza la convergencia o un número establecido de iteraciones. Los valores K y el número de iteraciones se definieron de antemano.

La clasificación dio como resultado 6 bandas diferenciadas, las cuales se utilizaron como base en la elección de las clases temáticas para correr una primera clasificación supervisada, junto con el conocimiento de campo adquirido de campañas anteriores en el glaciar y en zonas aledañas (años 2011, 2014 y 2016).

Se usó el método de Máxima Verosimilitud, el cual considera que los ND en el seno de cada clase se ajustan a una distribución normal, describiendo esa categoría por una función de probabilidad, a partir de su valor de medias y matriz de varianza-covarianza. Esa función asemeja la distribución real de los valores digitales de esa categoría y calcula la probabilidad de los demás píxeles de pertenecer a ella. A menos que se designe un umbral, todos los píxeles son clasificados dentro de la clase más probable. Es el clasificador más empleado por su robustez y por ajustarse con más rigor a la disposición original de los datos.

A partir de esta última clasificación, se ejecutó una segmentación de la imagen donde se agrupan los píxeles de características espectrales similares. Esta metodología ayuda a diferenciar más clases temáticas dentro de las ya seleccionadas, según sus valores digitales, siempre y cuando no disminuya el valor de separabilidad. Los valores de separabilidad espectral entre clases temáticas toman valores de 0 a 2 e indican la calidad de la toma de muestras. La medida de separabilidad espectral consiste en saber si estadísticamente existen diferencias significativas entre las distintas categorías, dando baja separabilidad si el valor resultante entre dos clases temáticas es menor a 1. En ese caso se consideró unificar las clases muy similares y editar las de valores medios mediante la toma de muestras más homogéneas o mayor cantidad. Esto dio como resultado la imagen clasificada de la Figura 7.



Clase temática	Color	Área [m <sup>2</sup> ]
Morenas laterales	Red	3304600
Morenas lateral y central	Dark Red	9111300
Detritos laterales	Brown	10734400
Detritos centrales	Orange	13694500
Hielo con detrito	Yellow	23679800
Hielo con poco detrito	Light Green	20263600
Hielo con grietas	Green	3331500
Hielo con grietas grandes	Yellow-Green	7107800
Hielo/agua/morena	Light Blue	11478300
Hielo con nieve derretida	Blue	40570100
Nieve/Hielo	Dark Blue	44586300

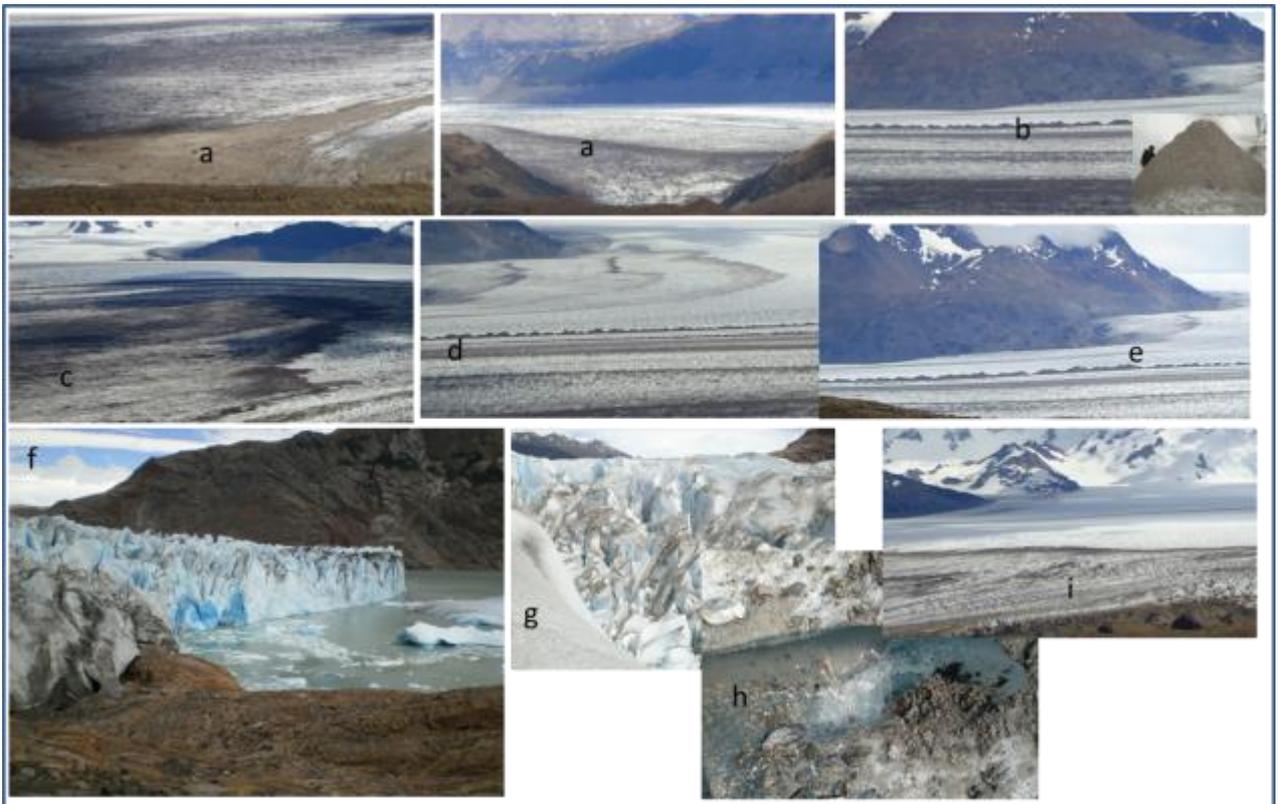
Fig. 7 – Imagen SPOT clasificada y leyenda de clases temáticas

Se obtuvieron finalmente once clases que representan distintos tipos de hielo y materiales detríticos que se pueden ver en detalle en la Fig. 8.

- Morenas laterales: morenas con gran cantidad de depósitos rocosos que se acumulan formando líneas morénicas en la parte norte del glaciar, compuestas por escombros acumulados de las paredes montañosas aledañas (cerros Huemul, Grande y Murallón, entre otros) los cuales se desgranar bajo la acción directa de los agentes exógenos de la atmósfera.
- Morenas lateral y central: forman las morenas más importantes del glaciar en tamaño y extensión y están compuesta por escombros mayormente disgregados del Nunatak central (con algo de contribución del Nunatak White cuyos escombros no se ven en la imagen pero si en fotos de campo), como consecuencia de la acción erosiva del hielo y agentes exógenos. La morena central está compuesta en parte por grandes *conos de fusión* o *conos de glaciar*,

formados por capas protectoras de cenizas volcánicas o depósitos de finos escombros que protegen al hielo cubierto. Lliboutry (1956) definió estas morenas como bandas de fusión de ceniza volcánica, originadas por erupciones del volcán Lautaro.

- Detritos laterales: los detritos laterales cubren gran parte de la superficie noreste de la zona de ablación y están compuestos por escombros acumulados de las paredes montañosas aledañas al igual que las morenas laterales. A diferencia de éstas, los detritos no siguen una línea definida.
- Detritos centrales: compuestos de material rocoso acumulado en grietas longitudinales y transversales, que en algunos casos siguen la misma línea que las morenas centrales.
- Hielo con detrito: hielo con detrito en suspensión a los lados de las morenas de la parte centro/norte, deja ver grietas de esfuerzo de tensión.
- Hielo con poco detrito: grietas pequeñas con poca acumulación de sedimentos que predominan en la parte sur de la lengua glaciar.
- Hielo con grietas: hielo resquebrajado con grietas marginales y transversales producto de esfuerzos de compresión.
- Hielo con grietas grandes: formado por grietas transversales y presente en zonas de mayor flujo como la central y en la curva sur, donde sufre grandes esfuerzos de compresión.
- Hielo/agua/morena: compuesta por grietas transversales al flujo glaciar con acumulación de agua, las cuales se ven en el frente del glaciar formando Seracs de gran tamaño, al igual que en la pequeña lengua sur que desemboca en la laguna Viedma, ambas zonas de expansión (Seracs son grandes bloques o grietas que se relacionan con cambios de pendiente).
- Hielo con nieve derretida: se ve en la parte más cercana a la zona de acumulación conformando grietas longitudinales.
- Nieve/Hielo: comprende la zona de transición más cercana a la acumulación ya que está en parte cubierta de nieve por los vientos dominantes del oeste que se depositan sobre grietas longitudinales en la margen sur, y marginales que gradan a longitudinales en la margen norte.



*Fig. 8 – Clases temáticas: (a) Morenas laterales, (b) Morena central y conos de fusión, (c) Detritos laterales, (d) Franjas de detritos centrales que se ven por debajo de la morena central, (e) Hielo con poco detrito que se ve por encima de la morena central, (f) Frente del glaciar con grietas, (g) Hielo con grietas grandes y seracs, (h) Hielo/agua/morena, (i) Nieve/Hielo cerca de la zona de acumulación.*

Los diferentes diseños de grietas en un glaciar se pueden explicar según los esfuerzos sean compresivos o tensionales. El hielo no es igualmente fuerte en todas las direcciones, por lo que las fracturas no siempre se asemejan a las direcciones de deslizamiento. Un esfuerzo longitudinal compresivo hará que el hielo tienda a expandirse lateralmente, pero estando este dentro de un valle como en este caso, en pendiente y en un terreno sinuoso, se desarrollan esfuerzos compresivos transversales. Lo contrario ocurre si los esfuerzos son de tensión, donde las grietas serán de tensión y transversales. La combinación de estos componentes da como resultado tres casos posibles (se considera que en algunos puntos cercanos al centro de la lengua glaciar habrá esfuerzos nulos) que se pueden ver en la Figura 9. Las líneas muestran las direcciones posibles de las grietas (Geoestudios, 2008).

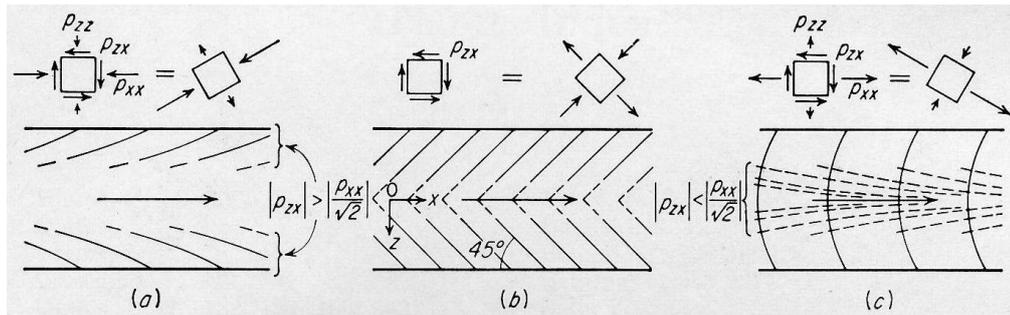


Fig. 9 – Vista en planta de los diferentes esfuerzos que pueden darse en la superficie de un glaciar; (a) compresivo; (b) nulo; (c) de tensión.

## IMAGEN RADAR

Se procesó la imagen Sentinel con el software SNAP (Sentinel Application Platform) versión 2.0.2 desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA). Para la correcta interpretación de los datos y su integración con la imagen óptica, la imagen radar fue primeramente calibrada, luego se le realizó el proceso de *multilook*, el cual corrige la distorsión generada por los numerosos looks de la imagen además de dar como resultado un pixel cuadrado con una resolución radiométrica mejorada. Posteriormente se realizó la corrección de terreno mediante el DEM SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) de la NASA (<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/mission.htm>). No se efectuó ningún filtro de ruido (speckle) para no perder la textura y datos originales de la imagen.

Se exportó la imagen radar para ser procesada junto con la óptica y se re proyectó al mismo sistema de proyección que ésta. Se generaron canales de texturas basados en una matriz de co-ocurrencia, la cual es función del ángulo y la distancia entre dos pixeles vecinos y muestra el número de ocurrencias de la relación entre un pixel y su vecino. Estos canales incluyen media, varianza, homogeneidad, contraste, disimilaridad, entropía, segundo momento y correlación. Se obtuvo así una nueva imagen con estas 8 bandas de texturas.

A partir de la correlación existente entre los canales generados y según su dispersión (mayor riqueza de datos) se eligieron tres canales representativos (Fig. 10). Se recortaron las imágenes tanto óptica como radar y se llevaron ambas a un mismo tamaño de pixel para poder combinarlas. Se fusionaron entonces las cuatro bandas de la imagen SPOT más las tres bandas texturales seleccionadas y una más de la imagen radar procesada en decibelios, generando de esta forma una imagen fusión de ocho bandas.

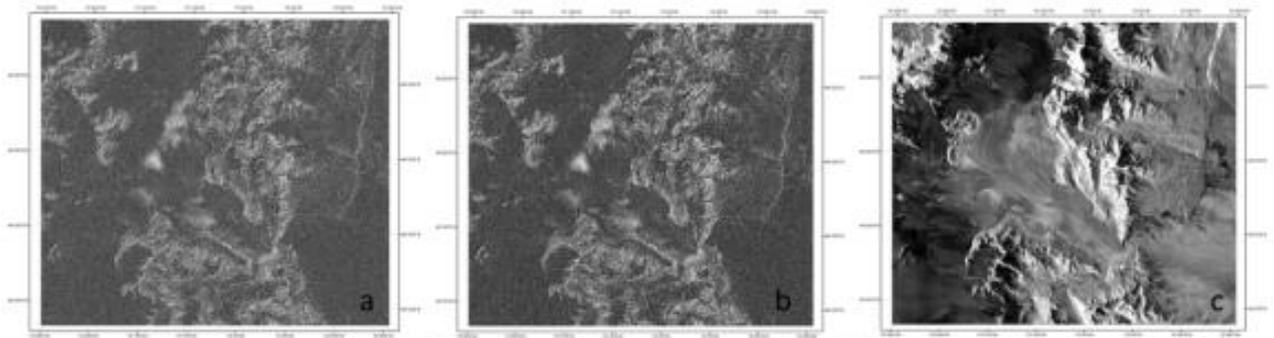


Fig. 10 – Bandas de texturas de la imagen radar: (a) Contraste; (b) Disimilaridad; (c) Media

## RESULTADOS

Antes de clasificar, se compararon los valores de separabilidad de las once clases obtenidas previamente entre la imagen SPOT y la fusionada, obteniendo mejores resultados en la fusionada tal como se aprecia en la Tabla 1. El valor mínimo subió algo más de un 10%, logrando que la mayoría esté por encima del 1,5.

Separabilidad de clases imagen SPOT			Separabilidad de clases imagen fusionada		
Hielo con grietas	Hielo con grietas grandes	1,2638	Hielo/agua/morena	Hielo con grietas grandes	1,4722
Hielo/agua/morena	Hielo con grietas grandes	1,3809	Hielo con grietas	Hielo con grietas grandes	1,4902
Detritos laterales	Hielo con detrito	1,5328	Detritos laterales	Hielo con detrito	1,5599
Hielo con poco detrito	Hielo con grietas grandes	1,5452	Hielo con grietas	Hielo con poco detrito	1,5945
Hielo con grietas	Hielo con poco detrito	1,5598	Hielo con grietas	Hielo/agua/morena	1,6128
Hielo con grietas	Hielo/agua/morena	1,5755	Hielo con poco detrito	Hielo con grietas grandes	1,6264
Morenas lateral y central	Detritos centrales	1,5808	Morenas lateral y central	Detritos centrales	1,6763
Morenas lateral y central	Detritos laterales	1,6561	Morenas laterales	Detritos centrales	1,747
Hielo con detrito	Hielo/agua/morena	1,6987	Detritos centrales	Hielo con detrito	1,7617
Detritos centrales	Hielo con detrito	1,7093	Morenas lateral y central	Detritos laterales	1,7747
Morenas laterales	Detritos centrales	1,7293	Detritos laterales	Detritos centrales	1,7902
Morenas lateral y central	Hielo con detrito	1,7357	Hielo con detrito	Hielo/agua/morena	1,8118
Detritos laterales	Detritos centrales	1,7647	Morenas lateral y central	Hielo con detrito	1,8158
Hielo con nieve derretida	Hielo con poco detrito	1,8005	Nieve/Hielo	Hielo con nieve derretida	1,8269
Nieve/Hielo	Hielo con nieve derretida	1,8185	Hielo con nieve derretida	Hielo con poco detrito	1,827
Morenas laterales	Detritos laterales	1,8417	Morenas laterales	Detritos laterales	1,8488
Hielo con grietas	Hielo con detrito	1,8753	Hielo con grietas	Hielo con detrito	1,901
Morenas lateral y central	Hielo/agua/morena	1,9083	Morenas lateral y central	Hielo/agua/morena	1,9104

Tabla 1 – Comparación de valores de separabilidad entre la imagen óptica y la fusionada con bandas radar

A partir de la información de la cobertura real del terreno obtenida de los muestreos de campo, se formaron las matrices de confusión de ambas imágenes. Se trata de matrices cuadradas que representan la fiabilidad de los datos deducidos por la clasificación. La diagonal de la matriz expresa el número de puntos de verificación en donde se produce acuerdo entre las dos fuentes (imagen y realidad), mientras que los marginales suponen errores de asignación, ya sea por parte del algoritmo utilizado para la clasificación como por el usuario. La relación entre el número de puntos correctamente asignados y el total expresa la fiabilidad global del mapa temático generado. El índice *kappa* expresa la diferencia entre la exactitud lograda en la clasificación y la chance de lograr una clasificación correcta con un clasificador aleatorio, cuanto más cercano a cero sea su valor, más se parece la clasificación a una aleatoria. Los valores se ven en la Tabla 2.

Matriz de confusión		
	SPOT	Fusión
Presición total [%]	87,7909	91,5991
Índice Kappa	0,8589	0,9014

Tabla 2 – Valores de precisión y Kappa de las clasificaciones

La clasificación final puede verse en la Figura 11.

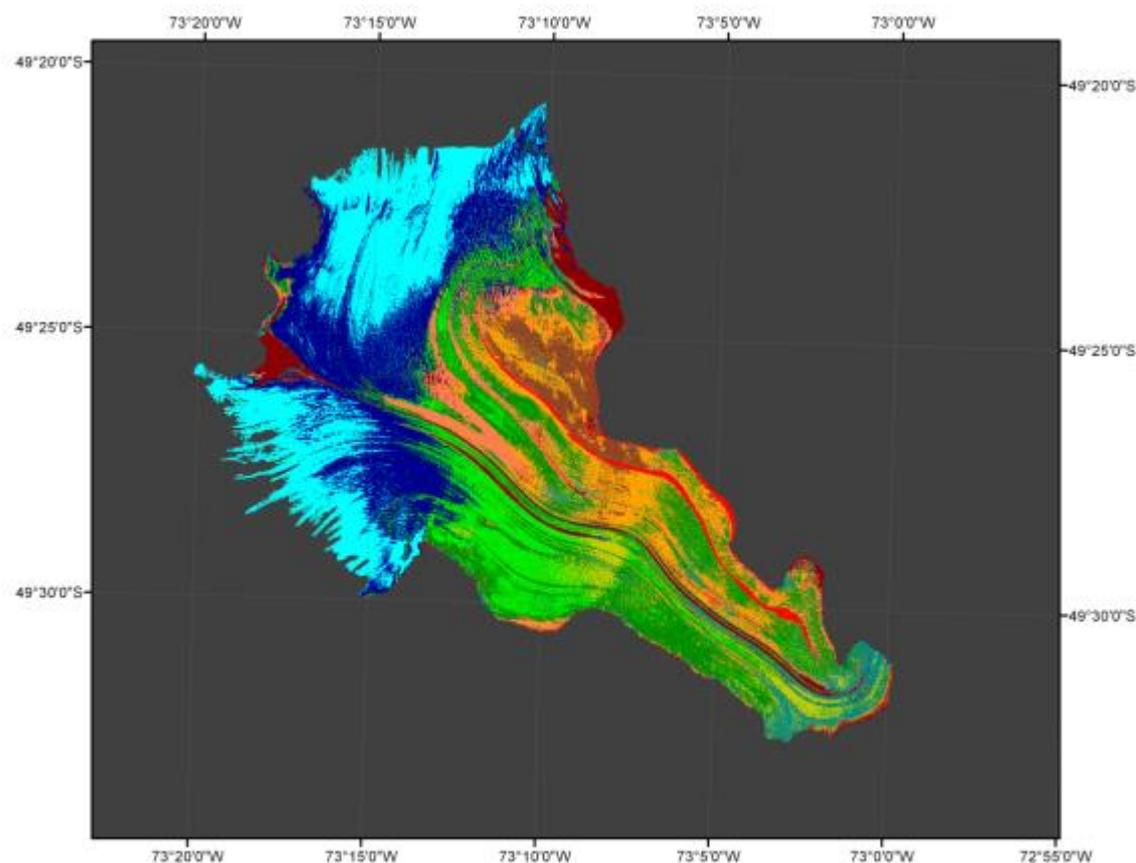


Fig. 11 – Clasificación de la imagen fusionada con bandas ópticas, radar y canales texturales

## CONCLUSIONES

La prueba de las metodologías resultó satisfactoria dado que la clasificación utilizando imágenes ópticas y radar en conjunto, tomando como clases las diferentes estructuras presentes en el hielo, demostró que la capacidad de discriminación de las mismas mejora notablemente. Como una conclusión general la metodología desarrollada en este trabajo resultó ser una herramienta muy poderosa para la identificación de distintas estructuras en zonas de hielo y glaciares con una aplicación muy concreta en toda la zona cordillerana.

Sumado a esto, las imágenes radar son un recurso muy potente en una zona como la de estudio donde por sus características climáticas está generalmente cubierta de nubosidad, especialmente en verano que es cuando la zona de ablación se encuentra libre de nieve. Se pudo comprobar mediante el análisis de la separabilidad de clases y los valores obtenidos de las matrices de confusión y sus correspondientes índices *kappa* y de confiabilidad, que la precisión de la clasificación, con la inclusión de las bandas derivadas, mejoró respecto a la realizada utilizando sólo las bandas espectrales SPOT.

El trabajo con imágenes SPOT y Sentinel con altas resoluciones similares hace posible obtener una clasificación de mejor calidad que las clasificaciones estándar con Landsat y demás sensores de resolución media. Asimismo, la corrección de terreno para calibrar la imagen Sentinel utilizando modelos digitales de elevación de mejor resolución también permite obtener una imagen radar de muy alta precisión. Además, el empleo de máscaras aporta a una buena diferenciación al eliminar los píxeles que no forman parte de las regiones de interés, evitando confusiones cuando se clasifica y los efectos del relieve montañoso.

Cabe aclarar que además de las bandas texturales se agregó al análisis una banda con la imagen radar en decibeles, lo cual mejoró aún más el resultado. El análisis de la información radar aporta otros datos a la clasificación; con respecto a nieve seca y húmeda, la penetración es mayor en la seca, y por ende hay mayor retrodispersión volumétrica en los gránulos internos de la nieve. En superficies con grietas y agua hay mayor retrodispersión por los rebotes en estas estructuras húmedas. Sin embargo, aún en zonas de alto relieve con presencia de deformaciones geométricas, el aporte del radar es muy útil. Aun así se debe tener en cuenta que es un complemento, ya que no se puede hacer un análisis confiable con una sola imagen de un único momento ya que son tantas las variables en juego (nevadas ocasionales, temperatura ambiente, posición del sol en el momento de la toma, etc.) que no llega a representar al objeto de estudio en su totalidad.

Como conclusión final se destaca la importancia del uso de estas tecnologías como una ayuda invaluable para estudios de cambios, siendo la teledetección con su constante actualización, una herramienta muy útil pero que, sin embargo, debe ser complementada con información de campo. Además se debe considerar la continua mejora de las capacidades de las imágenes SAR y los sistemas de procesamiento que permiten una más fácil obtención de productos con mucha información asociada, complementando de esta forma el uso de imágenes ópticas.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- Aniya, M., Sato, H., Naruse, R., Skvarca, P., Casassa, G., 1997. "Recent Glacier variations in the Southern Patagonia Icefield, South America". *Artic and Alpine Research*, Vol. 29, No. 1, pp. 1-12.
- Bertone, M., 1997. Aspectos Glaciológicos de la zona del Hielo Continental Patagónico. Edición del autor, 133 p., Buenos Aires.
- Chinni, G., 2004. "Glaciares del Lago Argentino & El Chaltén, Del Perito Moreno al Marconi". Zagier & Urruty Publications, 160 p., Ushuaia, Argentina.
- Chuvieco, E., 1995. "Fundamentos de teledetección espacial", 2da edición, Ediciones Rialp, S.A., Madrid.
- Nemiña, F., 2015. "Curso de Herramientas de Teledetección Cuantitativa" con el software SoPI, CONAE, Buenos Aires.
- De Agostini, A., 1945. Andes Patagónicos. Edición del autor, 2da edición, 437 p., Buenos Aires.
- Feruglio, E., 1944. "Estudios geológicos y glaciológicos en la región del Lago Argentino (Patagonia): (Expedición Alberto M. De Agostini 1930-31). Editor Academia Nacional de Ciencias, 255p.p. Argentina.
- Gari, J., Sedeño, A., Sánchez, C., Hallak, Y., Ortone, A. y Gironelli, J., 2008. Estudio Preliminar de cambios en Glaciares del Hielo Continental Patagónico. IV Congreso de la Ciencia Cartográfica, IGN. Buenos Aires.
- Gari, J., Ortone, A., Fernandez A., D., Macote Y., E., Pilato, G., 2015. "Estimación de características de los Glaciares Escondidos y del Glaciar Viedma a través de imágenes satelitales". Publicado en las Jornadas Argentinas de Geotecnologías 2015, organizadas por la Universidad Nacional de Lujan, Universidad Nacional de San Luis, y SELPER Argentina (Sociedad de Especialistas Latinoamericanos en Percepción Remota y SIG), San Luis.
- Gari, J., Ortone, A., Fernandez A., D., Macote Y., E., Pilato, G., Cook, L., Sedeño, A., 2016. "Estimación del balance de masas del Glaciar Upsala entre los años 1985 y 2016". XVII Simposio Internacional Selper, Misiones.
- Geoestudios LTDA., 2008. Manual de Glaciología, Vol. 2, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, S.I.T. No. 167. Chile.  
<http://step.esa.int>
- Lliboutry, L., 1956. Nieves y glaciares de Chile, Fundamentos de Glaciología. Ediciones de la Universidad de Chile, 471 p., Chile.
- Sentinel-1 Toolbox, 2015. "Interferometry Tutorial". ESA, ARRAY System computing Inc.