
Glaciares de Argentina: Resultados Preliminares del Inventario Nacional de Glaciares

Glaciers of Argentina: Preliminary Results of the National Inventory of Glaciers

Laura Zalazar¹, Lidia Ferri¹, Mariano Castro¹, Hernán Gargantini¹, Melisa Giménez¹, Pierre Pitte¹, Lucas Ruiz¹, Mariano Masiokas¹ y Ricardo Villalba¹

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

Resumen

Los glaciares constituyen reservas hídricas en estado sólido y son componentes cruciales del sistema hidrológico de montaña. A pesar de su importancia, no existía en Argentina información precisa sobre el número, ubicación y tamaño de estos cuerpos de hielo. En el año 2010, se sanciona la Ley 26639 de “Presupuestos Mínimos para la Preservación de los Glaciares y el Ambiente Periglacial”, que tiene como principales objetivos proteger los glaciares considerados como reservas estratégicas de recursos hídricos y crear el Inventario Nacional de Glaciares (ING), donde se individualicen todos los glaciares y geoformas periglaciales que actúan como reservas hídricas con toda la información necesaria para su adecuada protección, control y monitoreo. El inventario y monitoreo del estado de los glaciares y del ambiente periglacial es llevado a cabo por el Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA-CONICET) con la coordinación de la autoridad nacional de aplicación de la ley, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de Argentina (MAyDS). Este inventario se realiza en tres niveles que varían en complejidad y extensión espacial. En este trabajo se presentan los resultados preliminares obtenidos en el primer nivel, que consiste en el mapeo y caracterización de glaciares (descubiertos, cubiertos, manchones de nieve y de escombros) mediante sensores remotos. Estos datos son luego verificados en el campo en sectores seleccionados. Sobre un total de 70 cuencas y subcuencas delimitadas para el inventario se ha avanzado en 64. Hasta febrero de 2017, se han inventariado 15,482 glaciares que cubren una superficie de 5743 km².

Palabras clave: *Glaciares, inventario, montaña, recursos hídricos, Andes*

Abstract

Glaciers are strategic water reserves in solid state and are crucial components of the hydrological cycle in mountain regions. Despite their importance, there was no precise information on the number, location and size of glaciers in Argentina. In 2010, the National Law 26639 on “Minimum Standards for the Preservation of Glaciers and the Periglacial Environment” was promulgated. Its main objectives are the protection of glaciers, which are considered strategic reserves of water resources, and

the development of the National Glacier Inventory to identify glaciers and periglacial geoforms, recording and collecting all the necessary information for their proper protection, control and monitoring. The inventory and monitoring of the condition of glaciers is carried out by the Argentine Institute for Snow, Ice and Environmental Sciences (IANIGLA-CONICET) in collaboration with the Argentine Ministry of the Environment and Sustainable Development. The inventory is organized in three levels of different complexity and spatial extension. This paper summarizes the preliminary results of level one, which consists in the identification, mapping and characterization of glaciers (clean ice glaciers, debris-covered glaciers, snowfields and rock glaciers) through satellite images. The satellite-based mapping is validated through field campaigns in selected areas. Of the 70 basins and sub-basins delimited for the inventory, 64 have been studied. As of February 2017, the number of glacial and periglacial geoforms inventoried amounts to 15,482, covering a total area of 5743 km².

Keywords: *Glaciers, inventory, mountains, water resources, Andes*

Introducción

Los glaciares constituyen reservas hídricas en estado sólido y son componentes cruciales del sistema hidrológico de montaña y zonas adyacentes. Ayudan a la regulación de caudales, reduciendo las crecidas de deshielo y aportando recursos hídricos durante la época más seca. Estos cuerpos de hielo están siendo fuertemente afectados por el calentamiento global. El rápido retroceso de los glaciares constituye uno de los signos más claros del aumento de temperatura que experimenta la superficie terrestre. La reducción de las masas de hielo modifica paulatinamente los regímenes hidrológicos y los usos del suelo. Son también, potenciales factores de riesgo para las poblaciones ubicadas aguas abajo.

El interés por los glaciares se ha traducido en un creciente número de estudios y de inventarios a nivel global, regional y local. En Argentina se realizan inventarios desde 1960 como el de Bertone para los glaciares de vertiente Atlántica del Campo de Hielo Sur (Bertone, 1960) o los inventarios llevados a cabo por el IANIGLA-CONICET en los Andes Centrales de Argentina como el de la cuenca del

río Mendoza (Corte y Espizua, 1981). Sin embargo, se trata de datos parciales para algunas cuencas o sectores del país y, en la mayoría de los casos, datos desactualizados. Una recopilación de estos inventarios se puede consultar en el documento “Inventario Nacional de Glaciares y Ambiente Periglacial: Fundamentos y Cronograma de Ejecución” (IANIGLA-CONICET, 2010).

En el año 2010, se sanciona en Argentina la Ley 26639 de “Presupuestos Mínimos para la Preservación de los Glaciares y el Ambiente Periglacial”. Se establecen como principales objetivos proteger los glaciares considerados como reservas estratégicas de recursos hídricos y crear el Inventario Nacional de Glaciares (ING), donde se individualicen todos los glaciares y geoformas periglaciales con toda la información necesaria para su adecuada protección, control y monitoreo. Por ley, el Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA), unidad ejecutora del CONICET, es designado como el organismo encargado de realizar el ING con la coordinación de la autoridad nacional de aplicación, que es el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de Argentina (MAyDS).

Para la concreción del ING y el cumplimiento de sus objetivos, el IANIGLA ha desarrollado una estrategia de monitoreo que consta de tres niveles que varían en complejidad y extensión espacial. El nivel 1 representa la fase de mapeo y caracterización de la totalidad de los cuerpos de hielo del país. En el nivel 2, se analizan las fluctuaciones recientes de glaciares seleccionados. Por último, el nivel 3, representa el monitoreo de glaciares de referencia, el clima local y escorrentía de los ríos. Se focaliza en pocos glaciares y crioformas que son analizados en detalle. En este trabajo se presenta la metodología y resultados preliminares de los glaciares argentinos en el nivel 1.

Área de Estudio

La República Argentina ubicada en el extremo sur de América del Sur, tiene, de acuerdo con datos del Instituto Geográfico Nacional (IGN), una superficie de 2,791,810 km² en el continente americano y 969,464 km² reclamados en el sector Antártico (incluyendo Islas Orcadas) y las islas australes (Georgias del Sur y Sandwich del Sur). El país presenta un importante desarrollo latitudinal puesto que el sector continental se extiende desde los 21° 46' S hasta los 55° 03' S. Además, la presencia de la cordillera de los Andes en el oeste otorga una variabilidad altitudinal que alcanza su punto máximo en el centro oeste del país en el cerro Aconcagua con 6960 msnm, el más alto de los hemisferios Occidental y Sur. Estas variaciones latitudinales y altitudinales explican la presencia de glaciares en el oeste del país y las diferentes características que los mismos pueden adquirir de norte a sur en cuanto a la distribución espacial, superficie, cantidad y tipo de glaciar.

Con fines operativos y teniendo en cuenta las diferencias latitudinales y altitudinales, el país ha sido

dividido por el IANIGLA en cinco regiones (Figura 1). Esta regionalización se basa en el trabajo de Lliboutry (1999), quien dividió el área cordillerana de Argentina y Chile en cuatro regiones: Andes Desérticos y Andes Centrales (dentro de lo que denominó los Andes Áridos) y los Andes del Norte de la Patagonia o Andes de la región de los Lagos y Andes del Sur de la Patagonia o Andes Patagónicos (en lo que se reconoce como Andes Húmedos). A estas regiones se ha agregado para el inventario los Andes del Tierra del Fuego e Islas del Atlántico Sur, por tener características diferentes al resto de los Andes (IANIGLA-CONICET, 2010).

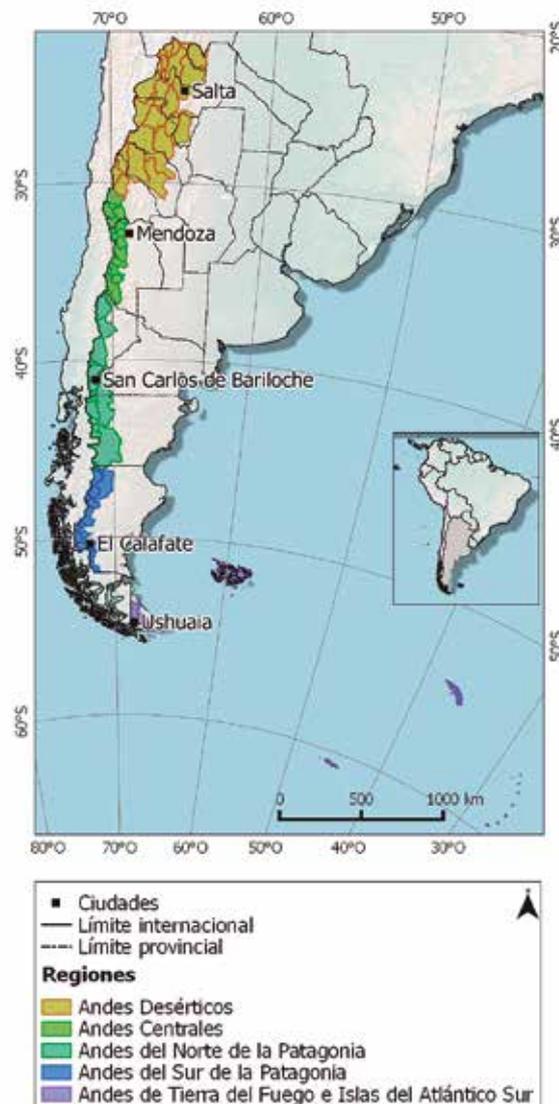


Figura 1. Regiones delimitadas en el ING y subcuencas que contienen las regiones.

Los Andes Desérticos se extienden en Argentina desde los 21° 46' S hasta aproximadamente los 31° S. Estos se caracterizan por las condiciones de aridez que limitan la formación del hielo y la acumulación de nieve a los picos más altos. Las precipitaciones provienen mayormente del Atlántico y están concentradas especialmente en los meses de verano (noviembre a marzo). El gradiente de humedad disminuye de este a oeste. En el sector oeste, las precipitaciones promedio son de alrededor de 300 mm

anuales; sin embargo, en algunos lugares pueden llegar a valores inferiores a los 50 mm anuales. En los cordones montañosos del este, se registran precipitaciones cercanas a los 400 mm anuales (Paoli, 2002). Con respecto al relieve, es posible diferenciar tres ambientes, la Puna al noroeste, la Cordillera Oriental al noreste, la Cordillera Frontal al suroeste y las Sierras de Pampeanas hacia el sureste. La Puna es una continuación del Altiplano boliviano. Es una región de montañas y mesetas elevadas que se encuentran por encima de los 3700 msnm (Caminos, 1999). Las mesetas están surcadas por cordones montañosos y volcanes con alturas máximas que superan los 6000 msnm y que llegan a los 6739 msnm en el cerro Lluillaco y a 6409 msnm en el volcán de Antofalla. La Cordillera Oriental es una continuación de sistemas montañosos que se desarrollan en Perú y Bolivia. En Argentina, está dividida en dos cordones, el oriental y el occidental. La parte occidental es la que alcanza mayores alturas con máximas que rondan los 6400 msnm. El cerro más alto es el Libertador General San Martín (6380 msnm) ubicado en los Nevados de Cachi. En el sector suroeste, encontramos los puntos más elevados de los Andes Desérticos, el monte Pissis (6882 msnm) y el cerro Ojos del Salado (6879 msnm).

Los Andes Centrales se encuentran entre los 31° S y 35° S. Esta región se caracteriza por la presencia de montañas de gran altura y mayores precipitaciones que en los Andes Desérticos. Las precipitaciones se producen predominantemente durante el otoño-invierno (abril a septiembre) y provienen especialmente de sistemas atmosféricos generados en el Pacífico. Las masas de aire provenientes del Pacífico chocan con la Cordillera de los Andes y descargan la humedad especialmente en las laderas occidentales (Chile) y los sectores montañosos más elevados. Inmediatamente hacia el este, las precipitaciones disminuyen drásticamente generando un importante gradiente transversal. Entre los 32° S y 35.5° S en los sectores pendiente arriba y más altos de la cordillera, los valores medios de precipitación se encuentran entre los 669 y 913 mm, mientras que en las zonas inmediatamente al este de la divisoria, el promedio de precipitaciones oscila entre los 281 y 795 mm (Viale, 2010). Los Andes Centrales también reciben influencia del Atlántico especialmente en los cordones más orientales. En esta región, encontramos el sector más alto de Cordillera de los Andes que alcanza el punto más elevado en el Aconcagua (6961 msnm). Otros cerros importantes son el Mercedario (6770 msnm) y el Tupungato (6635 msnm). Las mayores alturas se encuentran en el sector central y van disminuyendo paulatinamente hacia el sur. En esta región, la cordillera de Los Andes se divide en dos cordones principales. Hacia el oeste encontramos la Cordillera Principal en el límite con Chile y hacia el este la Cordillera Frontal, que alcanza su mayor desarrollo longitudinal en el sector central y se extiende latitudinalmente hasta aproximadamente los 34.4° S. En los Andes Centrales, tanto la mayor parte de la población como las principales actividades económicas se concentran en pequeños espacios irrigados, conocidos como oasis, ubicados aguas debajo de la zona cordillerana. Las ciudades más importantes de la región, como las

ciudades de Mendoza y San Juan, se ubican en estos oasis. Los ríos que dan vida a estos oasis se originan en las zonas montañosas y son altamente dependientes de las precipitaciones nivreas en la montaña y en menor medida de los glaciares.

Los Andes del Norte de la Patagonia se ubican entre los 35° S y 45° S. En este sector aumentan las precipitaciones pero disminuye la altura de la cordillera. Los vientos predominantes son del oeste y producen la mayor cantidad de precipitaciones en los meses de otoño – invierno (abril a septiembre). Los vientos húmedos provenientes del Pacífico descargan la humedad en el oeste (Chile) y en los cordones más elevados cercanos al límite (Rabassa, 1981). En consecuencia, las precipitaciones disminuyen de oeste a este, dando lugar a un fuerte gradiente en la distribución de las precipitaciones. Aproximadamente entre los 40° - 41° S, algunos sectores en la cordillera reciben en promedio anualmente 4000 mm, mientras que a unos 100 km de distancia hacia el este; en la Patagonia extrandina, estos valores llegan a 200 mm (Masiokas et al., 2008). La cordillera en este sector está compuesta por una serie de cordones montañosos interrumpidos por valles y lagos. Los picos más altos son el volcán Domuyo (4702 msnm), el volcán Lanín (3728 msnm) y el monte Tronador (3478 msnm). En las laderas de estos cerros se encuentran algunos de los glaciares más importantes de la región. Los ríos que nacen en los Andes del Norte de la Patagonia se alimentan especialmente de las abundantes lluvias, de la nieve caída en el invierno y en menor medida del aporte de los glaciares. Estos son muy importantes desde el punto de vista socio-económico, puesto que el agua es aprovechada aguas abajo para el consumo de la población, irrigación, industria y generación de energía eléctrica, entre otros usos (Masiokas et al., 2008).

Los Andes del Sur de la Patagonia se desarrollan entre los 45° S y los 53° S. La cordillera en esta región es de escasa altura. Sin embargo, temperaturas más bajas y precipitaciones abundantes distribuidas a lo largo de todo el año permiten el desarrollo de glaciares de gran tamaño. Los vientos son predominantes del oeste, al igual que en los Andes Centrales y los Andes del Norte de la Patagonia, y como en los casos anteriores se genera un fuerte gradiente oeste – este en la distribución de las precipitaciones. Al oeste, se alcanzan valores cercanos a los 7000-8000 mm anuales y en 100 km de distancia hacia el este se registran valores inferiores a los 300 mm (Masiokas, 2008). En este sector, se encuentra el Campo de Hielo Sur, que es compartido con Chile, y en donde se localizan los glaciares más grandes y emblemáticos del país. Los picos más altos de la región son el Mte. San Lorenzo o Cochrane (3706 msnm), el Mte. Fitz Roy (3405 msnm) y el cerro Perito Moreno (3393 msnm).

Los Andes de Tierra del Fuego e Islas del Atlántico sur se localizan entre los 53° S a 55° S. La cordillera de los Andes adopta en la isla de Tierra del Fuego una orientación oeste-este y puede ser dividida en un sector Occidental en Chile (cordillera Fueguina Occidental) y un sector Oriental

en Argentina (cordillera Fueguina Oriental). La altura de la cordillera disminuye de oeste a este, por lo que los vientos húmedos provenientes del Pacífico son interceptados en el sector Occidental y llegan con menor contenido de humedad al sector Oriental (Iturraspe, 2011). Los glaciares son mucho más pequeños, en comparación con los de los Andes del Sur de la Patagonia, pero siguen siendo abundantes. En el sector argentino, los cerros más altos tienen valores que rondan los 1450 msnm, como el Cornú, el monte Olivia, el cerro Vinciguerra y el cerro Alvear.

Materiales y Métodos

Desde el punto operativo y de organización del trabajo, las regiones han sido divididas en 70 cuencas y/o subcuencas hidrográficas, excepto en donde los acuerdos limítrofes no siguen este criterio. En estos casos, se adopta el límite cartográfico oficial obtenido del IGN. Estas subdivisiones constituyen los sectores de trabajo y se basan en la delimitación de cuencas realizada para todo el país por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación.

Las crioformas incluidas en el inventario son: glaciares descubiertos y cubiertos por detrito, manchones de nieve y glaciares de escombros con una superficie mayor a 0.01 km². Los glaciares descubiertos y cubiertos son considerados como cuerpos de hielo permanente generados sobre el suelo a partir de la recrystalización de la nieve y/o hielo debido a la compactación de su propio peso. En el caso de los glaciares descubiertos, se trata de cuerpos sin cobertura detrítica significativa, con evidencias de movimiento por gravedad (grietas, ojivas y morenas), mientras que los glaciares cubiertos son aquellos que presentan una cobertura detrítica significativa. Los manchones de nieve o glaciaretos son definidos como pequeñas masas de hielo de forma indefinida que pueden encontrarse en depresiones, adheridos o apoyados en las laderas de algún cerro, sin cobertura detrítica significativa y sin evidencias de movimiento. Deben estar visibles por períodos de al menos dos años. Los glaciares de escombros son entendidos como cuerpos de detrito congelado y hielo en su interior con evidencias de movimiento por acción de la gravedad y deformación plástica del permafrost. Este movimiento es el que genera los rasgos característicos superficiales (crestas y surcos) (IANIGLA-CONICET, 2010). Los glaciares de escombros son diferenciados en activos e inactivos de acuerdo a su grado de actividad. Los glaciares de escombros activos presentan frentes abruptos (>35°) con lineamientos de flujo, crestas y surcos longitudinales y transversales bien definidos. Una vez que dejan de moverse se llaman inactivos y aparecen como geoformas colapsadas con menor pendiente en el frente (<35°), también puede aparecer cierta cobertura vegetal (Haeberli, 1985; Ikeda, 2004). Existe una categoría especial que es la de glaciar cubierto con glaciar de escombros que se utiliza en casos en que un sector de hielo cubierto por detritos se transforma gradualmente en un glaciar de escombros. En general, es muy difícil identificar y determinar la posición exacta del límite entre el hielo cubierto y el glaciar de escombros en base a sensores remotos y por eso se incluyen dentro

de una misma categoría (IANIGLA-ING, 2014). Esta delimitación es incluso difícil mediante el reconocimiento en terreno, salvo que se establezcan estudios de precisión.

Las tareas de inventario incluyen la identificación y caracterización de glaciares a lo largo de aproximadamente 4000 km en la cordillera de los Andes a una escala de 1:25,000. Estos cuerpos de hielo se ubican mayormente en lugares de difícil acceso por lo que los sensores remotos a través de imágenes satelitales y Modelos Digitales de Elevación (MDE) representan un elemento esencial para el trabajo. La obtención, integración, visualización y análisis de los datos se realiza dentro del marco de los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

El trabajo requiere, como primer paso, la delimitación de las partes altas de las cuencas y/o subcuencas de los ríos que nacen en el oeste del país, que se realiza mediante el procesamiento de MDE de cobertura global como el SRTM. Los MDE son procesados automáticamente y el resultado es revisado y editado para realizar correcciones en caso de ser necesario.

Las imágenes satelitales ópticas constituyen la base sobre la que se realiza el trabajo cartográfico de identificación y delimitación espacial de los glaciares. Estas imágenes deben ser cuidadosamente seleccionadas para evitar que las mismas tengan nieve estacional o nubes. Las imágenes satelitales correspondientes al final del año de balance de masa (Cogley et al, 2011) muestran el mayor potencial con fines de inventario de glaciares, evitando la inclusión de nieve estacional como parte del área permanentemente englazada que sobrestime la superficie de un determinado glaciar. En el caso de glaciares extratropicales (al sur de los 31° S), el final del año de balance de masa coincide con el fin del verano, principios de otoño (marzo/abril), mientras que para los glaciares tropicales (al norte de los 31° S) se aproxima con el final de la temporada seca (fines de agosto y principios de septiembre). La presencia de nubes sobre el área a inventariar es un obstáculo importante que dificulta la identificación y delimitación correcta de los glaciares. Teniendo en cuenta estos criterios, se trabajó en todo el país con imágenes 2005-2012. Este rango temporal obedece a que hay sectores, especialmente al sur del país, donde es muy difícil conseguir imágenes que reúnan estos requisitos.

Las coordenadas están referidas al sistema de referencia global WGS84 y el sistema de proyección elegido es el UTM (Universal Transversal Mercator). Se ha trabajado en tres fajas de UTM, las cuencas más occidentales en 18S, las cuencas centrales 19S (la mayoría) y las más orientales 20S. En función del tipo de imagen utilizada, en algunos casos es necesario realizar algún tipo de corrección geométrica para lograr una correcta ubicación espacial. En estos casos, se utilizan como base imágenes LANDSAT procesadas por el USGS (United States Geological Survey). Estas imágenes son aceptadas internacionalmente como base de referencia (Tucker et al., 2004).

Tipo de glaciar	Resolución espectral de las imágenes satelitales	Resolución espacial de las imágenes satelitales	Método
Glaciares descubiertos y manchones de nieve	Multiespectrales Alos Aster Spot 4 Spot 5 Landsat)	Media 10 x 10 m 15 x 15 m (visible) 20 x 20 m 10 x 10 m 30 x 30 m (visible-IRCIRM)	Clasificación supervisada por objetos Índice de nieve (NSDI)
Glaciares de escombros y glaciares cubiertos	Multiespectrales o pancromáticas HRC (CBERS2) SPOT 5 Prism (ALOS)	Alta 2.5 x 2.5 m 2.5 x 2.5 m y 5 x 5 m 2.5 x 2.5 m	Digitalización manual

Tabla 1. Características más relevantes de las imágenes satelitales utilizadas para la realización del ING y su relación con el tipo de glaciar y métodos utilizados.

Tomando como base las imágenes satelitales seleccionadas, se inicia la tarea de extracción automática, digitalización y caracterización de glaciares en gabinete. De acuerdo con el tipo de glaciar, se trabaja con imágenes satelitales de resolución espacial media y multispectrales o escenas de alta resolución espacial pancromáticas o multispectrales. El tipo de glaciar y la disponibilidad de imágenes determinan también el método a utilizar (Tabla 1).

Los glaciares descubiertos y manchones de nieve se extraen automáticamente de las imágenes satelitales mediante la aplicación de cocientes entre bandas, índice de nieve NSDI (Normalized-Difference Snow Index) o clasificación supervisada. Estos métodos se basan en el comportamiento espectral del hielo, que es muy diferente a otras coberturas (Pellikka y Rees, 2009). Para aplicar estos métodos es necesario contar con imágenes multispectrales con bandas en el visible y el infrarrojo.

Independientemente del método que se utilice, en algunos casos, es necesaria una corrección manual para editar sectores que no han sido bien identificados como, por ejemplo, partes del glaciar que se encuentran en sombra, así como otras coberturas que puedan ser confundidas con hielo.

En el caso de los glaciares cubiertos o glaciares de escombros no es posible aprovechar esta diferencia espectral porque estos glaciares no son muy diferentes a los objetos que lo rodean. La digitalización manual es, en este caso, la metodología más utilizada a nivel internacional (Stokes et al., 2007). En ese sentido, las imágenes de alta resolución espacial son las herramientas más indicadas para delimitar estos cuerpos de hielo.

La caracterización de los glaciares se realiza mediante una base de datos única para todo el país que cuenta con 38 campos en los que se incluyen datos sobre la identificación de cada uno de los glaciares, tipo de glaciar, clasificación morfológica, y parámetros de índole física. En el diseño de la base de datos se consideraron las recomendaciones del programa GLIMS (Global Land Ice Measurements from Space; Paul et al., 2010). La clasificación morfológica de los glaciares sigue los lineamientos desarrollados inicialmente por el World Glacier Monitoring Service

(WGMS) y modificados posteriormente por el GLIMS (Rau et al., 2005). Sin embargo, se realizaron algunas adaptaciones dadas las particularidades que presentan muchos de los cuerpos de hielo existentes en algunos sectores de los Andes de Argentina, especialmente los Andes Centrales. En esta zona, los glaciares de escombros son muy numerosos y representan un recurso hídrico de suma importancia, por lo que las clasificaciones internacionales fueron ampliadas para incorporar este tipo de glaciares y sus características principales. Una descripción detallada de los campos incluidos en la base de datos, así como la forma de obtenerlos se puede consultar en el Manual para la realización del Inventario Nacional de Glaciares (IANIGLA-ING, 2014).

Estos datos procesados en gabinete son luego validados en el campo, en cada uno de los sectores de trabajo y en áreas seleccionadas de acuerdo a la accesibilidad y representatividad de la misma. Los principales objetivos de estas campañas son identificar en el terreno las geoformas inventariadas en gabinete a partir de imágenes satelitales, observar detalles morfológicos de las geoformas, verificar la clasificación de glaciares realizada, tomar fotografías y puntos de referencia y recorridos con equipos GPS.

Una vez cumplidas las etapas de mapeo y validación en el campo, los resultados son recopilados en mapas, informes y un servidor de mapas. Estos documentos pasan por diferentes instancias de revisión interna y también de organismos nacionales como el IGN y el MAyDS. Una vez aprobados, son publicados y quedan a disposición del público en el sitio web www.glaciaresargentinos.gov.ar.

Resultados

Hasta febrero de 2017, se han inventariado 15,482 glaciares mayores a 0.01 km², que cubren una superficie total de 5743 km². Sobre una total de 70 subcuencas, se ha avanzado en las tareas de inventario en 64. Aún falta iniciar el trabajo en tres subcuencas de los Andes Desérticos y en tres de Tierra del Fuego e Islas del Atlántico Sur. De este total de subcuencas, para las cuales se cuenta con información, 29 están terminadas y publicadas. El resto de los resultados que se presentan son preliminares (Figura 2).



Figura 2. Estado de procesamiento de los datos analizados.

A partir del trabajo de inventario se constató que, del total de subcuencas inicialmente delimitadas, cuatro de ellas no tienen glaciares, dos en los Andes Desérticos, una en los Andes del Norte de la Patagonia y otra en los Andes del Sur de la Patagonia.

En la Tabla 2, se presentan los principales resultados obtenidos por cada una de las subcuencas agrupados según las regiones en que fue dividido el trabajo de inventario. La misma incluye cifras que resultan del procesamiento de datos finales y preliminares. Se espera que estos datos no varíen significativamente cuando se incorpore la información de los sectores que aún no han sido inventariados.

Los glaciares se distribuyen al oeste del país desde el extremo norte hasta el extremo sur. En el norte, es donde más se extienden hacia el este y donde adquieren mayor dispersión y menor densidad. En el resto del país, los cuerpos de hielo se retraen hacia el oeste y hay muy pocos lugares donde no se han identificado glaciares (Figura 3).

La región del país con mayor superficie cubierta con hielo corresponde a los Andes del sur de la Patagonia, que concentra el 59.6% de todo el país, seguida por los

Andes Centrales con el 30.8%, los Andes del Norte de la Patagonia con el 5.1%, los Andes Desérticos con el 4.2% y, finalmente, los Andes de Tierra del Fuego e Islas del Atlántico Sur con el 0.4% (Tabla 2).

Los Andes Centrales es la región del país que tiene la mayor cantidad de glaciares con el 52.2% del total, seguida por los Andes Desérticos con el 15.7%, los Andes del Sur de la Patagonia con un 15.6%, los Andes del Norte de la Patagonia con el 13.6% y finalmente los Andes de Tierra del Fuego e Islas del Atlántico Sur con un 2.9% (Tabla 2).

Del análisis anterior, se desprende que los Andes del Sur de la Patagonia es la región con mayor superficie cubierta con glaciares, pero no la que tiene mayor cantidad de glaciares. Es decir, que tiene pocos glaciares pero de gran superficie. Por su parte, los Andes Centrales es la que tiene la mayor cantidad de glaciares, pero con superficies más pequeñas que los anteriores, aunque sumados ocupan el segundo lugar en el país en cuanto a superficie (Figura 4).

A nivel país, del total de superficie con hielo, el 74% corresponde a glaciares descubiertos, seguido por la de glaciares de escombros con un 11%. El resto de las categorías, glaciar cubierto, cubierto con glaciar de escombros, y manchones de nieve, presentan valores muy similares de alrededor del 5% cada una.



Figura 3. Distribución espacial de los glaciares de Argentina de acuerdo al ING.

Región	Superficie con glaciares (km ²)	Porcentaje de superficie con glaciares (%)	Cantidad de glaciares	Porcentaje de la cantidad de glaciares (%)
Andes Desérticos	241	4.2	2429	15.7
Andes Centrales	1767	30.8	8078	52.2
Andes del Norte de la Patagonia	292	5.1	2112	13.6
Andes del Sur de la Patagonia	3422	59.6	2420	15.6
Andes de Tierra del Fuego e Islas del Atlántico Sur	21	0.4	443	2.9
Total	5743	100	15,482	100

Tabla 2. Principales resultados del ING discriminados por región.

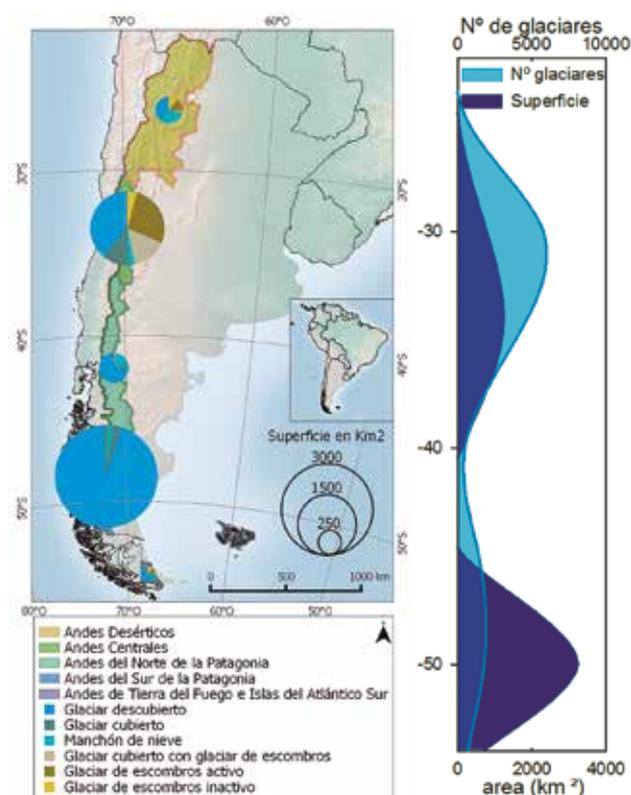


Figura 4. En el mapa de la izquierda, se observa con círculos proporcionales la superficie inventariada para cada una de las regiones, y dentro de cada región, la superficie cubierta por tipo de glaciar. En el gráfico de la derecha, se presenta la relación entre cantidad de glaciares y superficie cubierta con hielo.

Del total de superficie cubierta con hielo descubierto en el país, el 76% se encuentra en los Andes del Sur de la Patagonia y el 17% en los Andes Centrales. Mientras que, del total de superficie cubierta con glaciares de escombros, el 86% corresponde a los Andes Centrales, seguida por el 9% en los Andes Desérticos.

La altura media mínima a la que aparecen los glaciares va disminuyendo de norte a sur desde los 5000 msnm en promedio en los Andes Desérticos a los 930 msnm en Tierra del Fuego e Islas del Atlántico Sur. La menor altura de la cordillera hacia el sur va siendo compensada por una disminución de la temperatura y aumento de las precipitaciones, que generan condiciones propicias para la presencia de glaciares.

Los resultados preliminares confirman las variaciones regionales derivadas de las características topográficas y el clima. Sin embargo, dentro de las regiones existen también diferencias.

Andes Desérticos

Esta región tiene el 4.2% de la superficie englazada del país y el 15.7% de los glaciares. La presencia de la cordillera Oriental y la altura que alcanza permite la presencia de glaciares de escombros a longitudes cercanas a los 65° O. En esta región es donde los glaciares alcanzan la mayor extensión longitudinal a nivel país.

Los glaciares son pequeños, con una superficie media para todas las categorías de 0.1 km². El glaciar de mayor tamaño es el Pissis, que forma un campo de hielo, con una superficie próxima a los 18 km². Está ubicado en el límite de las subcuencas Blanco Superior y Abaucán - Laguna Verde.

En promedio los glaciares de esta región en todas sus categorías se ubican por encima de los 5000 msnm. Un análisis por tipo de glaciar indica que los glaciares descubiertos se localizan a una altura media mínima de 5200 msnm, los manchones de nieve sobre los 5500 y los glaciares de escombros arriba de los 4500 msnm. La orientación predominante es la sureste seguida por la sur.

Si analizamos globalmente los datos obtenidos en esta región en cuanto a la superficie cubierta por cada tipo de glaciar, se observa un predominio de las categorías correspondientes a glaciares descubiertos y manchones de nieve, que en conjunto alcanzan el 73% de la superficie cubierta con hielo, existiendo muy pocos glaciares cubiertos y cubiertos con glaciar de escombros. Sin embargo, estos resultados no son representativos de todas las cuencas. En el sector norte hasta aproximadamente los 24° S, sólo encontramos glaciares de escombros. A medida que avanzamos hacia el sur, especialmente por el oeste, empiezan a ganar importancia los manchones de nieve que comienzan a aparecer alrededor de los picos más altos de 5500-6000 msnm y en algunas cuencas llegan a ser la categoría más importante en cuanto a la superficie que cubren. En los cordones montañosos ubicados hacia el este, los glaciares de escombros siguen siendo la categoría más

importante hasta aproximadamente los 28° S. Los primeros glaciares descubiertos se observan a partir de los 26.5° S particularmente en los cordones montañosos del oeste y en los cerros más altos. Aproximadamente en el 90% de los casos se trata de glaciares de montaña. Esta categoría va adquiriendo cada vez más importancia hacia el sur, hasta llegar a ser la más importante en las subcuencas de La Palca y Blanco Inferior, ambas ubicadas en la cuenca del río Jáchal. Los primeros glaciares cubiertos aparecen aproximadamente a los 29° S.

A medida que avanzamos hacia el sur se incrementa notablemente la cantidad de glaciares y la superficie con hielo. Las cuencas ubicadas al sur de los 26.5° S contribuyen con el 70% de la superficie cubierta de hielo de la región.

Andes Centrales

Esta zona tiene la segunda mayor superficie englazada del país, con aproximadamente el 30.8% y la primera en cuanto a la cantidad glaciares con el 52.2%.

Los glaciares son de mayor superficie que en los Andes Desérticos. El área promedio es de 0.22 km², sólo diez glaciares superan los 10 km². El glaciar de mayor tamaño es el Tunuyán con 57 km² y está ubicado en la cuenca del río Tunuyán. El 96% de los glaciares tienen una superficie inferior a 1 km². En general, los glaciares, incluyendo todas las categorías, se ubican por encima de los 4100 msnm. Los glaciares de escombros aparecen en promedio a cotas más bajas de 3800 msnm, mientras que los glaciares descubiertos se ubican por encima de los 4400 msnm. Estos valores son promedios regionales; sin embargo, en las cuencas ubicadas al sur de los Andes Centrales podemos encontrar glaciares descubiertos a partir de los 3460 msnm y glaciares de escombros sobre los 3200 msnm.

Esta región se caracteriza por tener una importante diversidad, pues cuenta con todos los tipos de glaciares. Estas geoformas, además, interactúan y podemos encontrar todo tipo de transiciones, ya que es común encontrar glaciares descubiertos que en la lengua se van cubriendo por detritos hasta terminar en glaciares de escombros. Estas interacciones dan lugar a formas complejas poco descritas en la bibliografía y que convierten a la zona en una de las más difíciles e interesantes de interpretar y mapear. Son frecuentes los glaciares cubiertos y es una de las zonas con mayor densidad de glaciares de escombros del mundo (Trombotto y Ahumada, 2005)

A nivel regional, la categoría más importante en cuanto a superficie ocupada es la de glaciar descubierto con el 39% seguida por la de glaciar de escombros con el 31%, glaciar cubierto con glaciar de escombros con el 15%, glaciar cubierto con el 11% y manchón de nieve con el 4%.

En general, en las cuencas del norte, aproximadamente hasta los 32.5° S, los glaciares de escombros tanto activos como inactivos constituyen la categoría predominante en cuanto a la superficie que cubren. La subcuenca del río

Blanco, en la cuenca del río San Juan, es la que posee la mayor superficie cubierta con glaciares de escombros con el 20% del total de la región seguida por la subcuenca del río Los Patos en la misma cuenca con el 12%. Estas cuencas no sólo tiene el máximo a nivel regional sino también en el país. Hacia el sur, y particularmente en las cuencas ubicadas hacia el oeste en la Cordillera Principal, las categorías de glaciares descubiertos y cubiertos comienzan a ser predominantes. La subcuenca del río Tupungato en la cuenca del río Mendoza y la subcuenca del Tunuyán norte en la cuenca del río Tunuyán son las que poseen la mayor superficie con hielo descubierto, con el 20% del total cada una. Los glaciares de montaña son los más numerosos con un 75%, mientras que los de valle representan el 25% restante. En las cuencas ubicadas hacia el este, predominan en general las categorías de glaciar de escombros y de glaciar cubierto con glaciar de escombros. La orientación predominante de todos los tipos de glaciares en conjunto es en primer lugar sur y en segundo lugar sureste.

Andes del Norte de la Patagonia

La superficie ocupada por los glaciares de esta región representa el 5.1% del total del país mientras que la cantidad de glaciares constituye el 13.6%.

El tamaño medio de los cuerpos de hielo es de 0.1 km², valor similar al de los Andes Desérticos e inferior al de los Andes Centrales. Los glaciares de mayor tamaño son el Esperanza que tiene 10 km², seguido por el Manso con 7.5 km², ambos ubicados en la cuenca de los ríos Manso y Puelo.

Las categorías que ocupan mayor superficie son, en primer lugar, los glaciares descubiertos con el 75% y, en segundo lugar, los manchones de nieve con el 21%. El resto de las categorías representan tan solo el 4%. Hay muy pocos glaciares cubiertos con glaciar de escombros, sólo aparecen en el norte de la región. Las cuencas del Puelo Inferior y Futaleufú son las que tienen mayor cantidad de superficie ocupada con glaciares, en conjunto suman el 71% de la superficie total de hielo. La subcuenca del Puelo Inferior es la que tiene el mayor porcentaje de hielo descubierto de la región con el 42% mientras que la del Futaleufú es la que tiene la mayor cantidad de superficie con manchones de nieve, con el 47%. La mayoría de los glaciares descubiertos son glaciares de montaña, alrededor del 93%, el resto son glaciares de valle. La orientación predominante de todos los tipos de glaciares es la este seguida por la sur.

En promedio, los glaciares de esta región se ubican por encima de los 1800 msnm. Un análisis por categoría muestra que la altura media mínima a la que encontramos los glaciares descubiertos es 1700 msnm y los manchones de nieve unos 100 m más arriba, mientras que los glaciares de escombros se localizan generalmente a partir de los 2500 msnm.

Andes del Sur de Patagonia

Esta región posee el 59.6% de la superficie con hielo del país y el 15.6% de la cantidad total de glaciares.

La superficie media de los glaciares es de 1.4 km², muy superior al resto de las regiones. Los glaciares de mayor tamaño de la región y del país son el Upsala con 786 km², seguido por el Viedma con 737 km² (en la Argentina) y el Perito Moreno con 244 km².

La categoría que ocupa la mayor extensión es la de glaciares descubiertos con el 95%, mientras que los glaciares de escombros representan menos del 1% de la superficie.

Dentro de la región, se observan situaciones muy diferentes. La subcuenca que tiene la mayor superficie ocupada con hielo es el Brazo Norte del Lago Argentino, con 1308 km², mientras que la del río Coig es la que menos tiene, con apenas 3 km².

La cuenca del río Santa Cruz tiene el 89% del hielo de toda la región y el 53% del hielo de todo el país. En ella se encuentran los glaciares de mayor tamaño de Argentina, que se desprenden del Campo de Hielo Sur. El área media de los glaciares en esta cuenca es de 2.8 km².

En esta región, todos los tipos de glaciares se ubican a una altura mínima promedio de 1510 msnm. Los glaciares descubiertos se encuentran, en general, por encima de los 1400 msnm, mientras que los glaciares de escombros se ubican mayormente sobre los 1600 msnm al igual que los manchones de nieve. En la cuenca del río Santa Cruz, los glaciares descubiertos se encuentran, en promedio, a partir de los 1250 msnm y los cubiertos, arriba de los 1380 msnm. Los glaciares de mayor tamaño como el Viedma, el Upsala y el Perito Moreno alcanzan cotas mínimas cercanas a los 200 msnm.

En los Andes del Sur de la Patagonia, encontramos glaciares descubiertos de descarga, de valle y de montaña. Los glaciares de montaña siguen siendo los más numerosos, con aproximadamente el 92%. La orientación predominante para todos los tipos de glaciares es, en primer lugar, la sureste y, en segundo lugar, la este.

Las cuencas ubicadas al norte y al sureste son las que tienen menor superficie cubierta con hielo y las que tienen mayor diversidad en cuanto a la tipología de glaciares. En estas cuencas, aumentan las condiciones de aridez y los glaciares de escombros se tornan más frecuentes. En los sectores localizados hacia el centro oeste, los glaciares descubiertos tienen un total predominio en cuanto al número y superficie cubierta.

Andes de Tierra del Fuego e Islas del Atlántico Sur

Tiene el 0.4% de la superficie con glaciares del país y el 2.9% del total de glaciares. Es importante aclarar que es la región con menor superficie.

Los glaciares son pequeños, de montaña, y se encuentran concentrados en los sectores más altos de la cordillera. El tamaño medio de los glaciares es de 0.05 km² y el valor máximo de 0.9 km² se alcanza en el glaciar Grande. Sólo cinco glaciares superan los 0.5 km².

En esta región, encontramos todos los tipos de glaciares incluidos en el inventario. La categoría que cubre la mayor superficie es la de los glaciares descubiertos con el 57% seguida por los glaciares de escombros con el 25% y manchones de nieve con el 18%.

En promedio, todas las categorías de glaciares se ubican por encima de los 930 msnm. Los glaciares descubiertos se ubican en promedio por encima de los 940 msnm y los manchones de nieve a 971 msnm, mientras que los glaciares de escombros a alturas próximas a los 870 msnm.

Los glaciares se concentran alrededor del lago Fagnano. Sin embargo, el 87% de la superficie cubierta con glaciares y la totalidad de los glaciares descubiertos se encuentra al sur del mismo. Al norte del lago sólo encontramos glaciares de escombros y algunos manchones de nieve. La orientación predominante es la sur, seguida por la sureste.

Conclusiones

La aplicación de la Ley 26636 ha permitido avanzar en el conocimiento de la ubicación, superficie y características de los glaciares en la Argentina y generar información esencial para su protección.

El análisis y procesamiento de información proveniente de sensores remotos, como imágenes satelitales y MDE, y su integración en el marco de los SIG, han dado lugar a una extensa y completa base de datos espacial, cuya información ha sido además validada en el campo. Estos datos están disponibles, para el público en general, en aquellas zonas en las que ya se ha concluido el trabajo y puede ser obtenida en la página web www.glaciaresargentinos.gob.ar. Además, la utilización de una misma metodología a lo largo de toda la extensión del país permite que los datos sean totalmente comparables.

Los resultados obtenidos confirman las diferencias regionales que responden a condiciones ambientales determinadas por variaciones climáticas y topográficas. El sector del país con mayor superficie cubierta por glaciares es el sur de la Patagonia. En esta región, se encuentran también los glaciares de mayor tamaño. Sin embargo, glaciares más pequeños en otras regiones, como los Andes Desérticos y Centrales, desempeñan un rol muy importante debido a la aridez del clima.

Estos datos constituyen una primera aproximación al conocimiento de todos los glaciares del país, aportando información valiosa para la planificación de las actividades en la montaña, para cuantificar el volumen de las reservas de agua dulce contenidas en estos cuerpos de hielo, para la determinación del potencial hidrológico de las cuencas, para la investigación de los glaciares y su interacción con los ambientes de montaña y sus perspectivas en el marco del cambio climático, entre otros. Estos estudios más profundos se irán realizando a medida que se avance en la implementación de los siguientes niveles del ING.

Referencias

- Bertone, M. (1960). *Inventario de los glaciares existentes en la vertiente Argentina entre los paralelos 47°30' y 51° S*. Publicación 3. Buenos Aires, Instituto Nacional del Hielo Continental Patagónico, Ministerio de Educación y Justicia de la Nación.
- Caminos, R. (Ed.). (1999). Geología argentina. *Anales*, 29. Buenos Aires, Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR), Instituto de Geología y Recursos Minerales.
- Cogley, J. G., Hock, R., Rasmussen, L. A., Arendt, A. A., Bauder, A., Braithwaite, R. J., . . . Zemp, M. (2011). *Glossary of glacier mass balance and related terms*. IHP-VII Technical Documents in Hydrology, 86; IACS Contribution, 2; UNESCO Working Series SC-2011/WS/4. Paris, UNESCO-International Hydrological Programme (IHP).
- Corte, A. E. y Espizua, L. E. (1981). *Inventario de glaciares de la cuenca del río Mendoza*. Mendoza, Argentina, IANIGLA-CONICET.
- IANIGLA-CONICET. (2010). *Inventario Nacional de Glaciares y Ambiente Periglacial: Fundamentos y cronograma de ejecución*. Mendoza, Argentina, Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).
- IANIGLA-ING. (2014). *Manual para la realización del Inventario Nacional de Glaciares*. [Castro, M., Delgado, S., Ferri H., L. y Zalazar, L.]. Mendoza, Argentina, ING, IANIGLA-CONICET.
- Iturraspe, R. J. (2011). *Glaciares de Tierra del Fuego*. Buenos Aires, Editorial Dunken.
- Lliboutry, L. (1999). Glaciers of Chile and Argentina. En R. S. Williams, Jr., R. S. y J. G. Ferrigno, J. G. (Eds.). *Satellite image atlas of glaciers of the world. South America*. (U.S. Geological Survey Professional Paper 1386-I-6). Denver, Colorado, U.S. Geological Survey.
- Masiokas, M. (2008). *Climate and glacier variability during past centuries in the North and South Patagonian Andes of Argentina*. Tesis doctoral. London, Ontario, The University of Western Ontario.
- Masiokas, M., Villalba, R., Luckman, B. H., Lascano, M. E., Delgado, S. y Stepanek, P. (2008). 20th-century glacier recession and regional hydroclimatic changes in northwestern Patagonia. *Global and Planetary Change*, 60, 85–100.
- Paoli, H. (2002). *Recursos hídricos de la puna, valles y bolsones áridos del Noroeste Argentino*. Salta, Argentina, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Salta.
- Paul, F., Barry, R. G., Cogley, J. G., Frey, H., Haeberli, W., Ohmura, A., . . . Zemp, M. (2010). *Guidelines for the compilation of glacier inventory data from digital sources*. Zürich, Universidad de Zürich, WGMS, GLIMS, GlobGlacier.
- Pellikka, P. y Rees, W. G. (2009). *Remote sensing of glaciers: Techniques for topographic, spatial and thematic mapping of glaciers*. London, CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Rabassa, J. (1981). Inventario de glaciares y cuerpos de nieve en los Andes Patagónicos Septentrionales, Argentina. *Actas del VIII Congreso Geológico Argentino, San Luis*, 4, 109-122. Buenos Aires, Asociación Geológica Argentina.
- Rau, F., Mauz, F., Vogt, S., Singh Khalsa, S. J. y Raup, B. (2005). *Illustrated GLIMS glacier classification manual*. Freiburg, Alemania, GLIMS Regional Center “Antarctic Peninsula”.
- Stokes, C. R., Popovnin, V., Aleynikov, A., Gurney, S. D. y Shahgedanova, M. (2007). Recent glacier retreat in the Caucasus Mountains, Russia, and associated increase in supraglacial debris cover and supra-/proglacial lake development. *Annals of Glaciology*, 46(1), 195-203.
- Trombotto, D. T. y Ahumada, A. L. (2005). *Los fenómenos periglaciales: Identificación, determinación y aplicación*. Opera Lilloana 45. Tucumán, Argentina, Fundación Miguel Lillo.
- Tucker, C. J., Grant, D. M. y Dykstra, J. D. (2004). NASA's global orthorectified Landsat data set. *Photogrametric Engineering & Remote Sensing*, 70(3), 313–322.
- Viale, M. (2010). *Características de las precipitaciones orográficas de invierno sobre los Andes Subtropicales Centrales*. Tesis doctoral. Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.