



INVENTARIO NACIONAL DE GLACIARES

IANIGLA
CONICET

U.N. CUYO
GOBIERNO
DE MENDOZA



Ministerio de Ambiente
y Desarrollo Sustentable
Presidencia de la Nación

**Informe de la subcuenca
del Salar de Cauchari
Cuencas Varias de la Puna**

Provincias de Salta y Jujuy

Glaciar de escombros en la subcuenca salar de Cauchari (Foto: L. Ferri)

**MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SUSTENTABLE
PRESIDENCIA DE LA NACIÓN**

**Autoridad Nacional de Aplicación – Ley 26.639 – Régimen de Presupuestos
Mínimos para la Preservación de los Glaciares y del Ambiente Periglacial**

Presidente de la Nación: Ing. Mauricio Macri

Ministro de Ambiente y Desarrollo Sustentable: Rabino Sergio Bergman

Unidad de Coordinación General: Dra. Patricia Holzman

Secretario de Política Ambiental en Recursos Naturales: Lic. Diego Moreno

Director Nacional de Gestión Ambiental del Agua y los Ecosistemas Acuáticos: Dr. Javier García Espil

Coordinador de Gestión Ambiental del Agua: Dr. Leandro García Silva

Responsable Programa Protección de Glaciares y Ambiente Periglacial: M.Sc. María Laila Jover

**IANIGLA – CONICET
Inventario Nacional de Glaciares (ING)**

Director del IANIGLA: Dr. Fidel Roig

Coordinador del ING: Ing. Gustavo Costa

Director técnico: Lic. Hernán Gargantini

Profesional: Lic. Laura Zalazar

Colaboradores: Lic. Lidia Ferri Hidalgo

Mayo 2018

La presente publicación se ajusta a la cartografía oficial establecida por el Poder Ejecutivo Nacional a través del Instituto Geográfico Nacional por Ley 22963 y ha sido aprobada por Expte. EX – 2017 – 35435428 – APN – DGA#IGN, de fecha 22 de enero de 2018

ÍNDICE

1. Introducción	1
2. Antecedentes	4
3. Definiciones a los fines del Inventario	6
4. Materiales y métodos	8
4.1. Delimitación de cuencas hidrográficas a partir de modelos de elevación	9
4.2. Selección de imágenes satelitales y georreferenciación	10
4.3. Delimitación del hielo descubierto	13
4.4. Digitalización de glaciares cubiertos y glaciares de escombros	13
4.5. Base de datos de las geoformas inventariadas	13
4.6. Control de campo	15
5. Resultados	16
5.1. Subcuenca Salar Cauchari	16
5.2. Control de campo	20
6. Bibliografía	21
7. Anexos	25
7.1. Imágenes utilizadas en el inventario de la subcuenca Salar de Cauchari	25
7.2. Control de campo en la subcuenca Salar de Cauchari	26
7.2.1 Objetivos	27
7.2.2. Resultados. Geoformas relevadas	27
7.3. Descripción de la base de datos	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Cerro Llullaillaco 6.739 msnm, con manchones de nieve perennes en su sector chileno (Messerli et al 1993).	5
Figura 2: Mapa de ubicación de la subcuenca Salar de Cauchari.	9
Figura 3: Diagrama de flujo de la metodología usada.	12
Figura 4: Ejemplo de la importancia de la resolución espacial de las imágenes en la identificación de crioformas. En la parte izquierda puede observarse un glaciar de escombros en una imagen SPOT5 (10 m de resolución). A la derecha se pueden apreciar las mismas crioformas con mucha mayor claridad, en una imagen CBERS 2 de 2,5 m de resolución espacial.	13
Figura 5: Cuerpos de hielo en la subcuenca Salar de Cauchari.	17
Figura 6: Distribución de los cuerpos de hielo inventariados, subcuenca Salar de Cauchari.	17
Figura 7: Orientación de los cuerpos de hielo inventariados en la subcuenca Salar de Cauchari.	18
Figura 8: Distribución del número y superficie de los cuerpos de hielo inventariados por áreas en la subcuenca Salar de Cauchari.	18
Figura 9: Hipsometría de los cuerpos de hielo, subcuenca Salar de Cauchari.	19

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Imágenes de los sensores utilizadas como base para el Inventario de la subcuenca Salar de Cauchari (ver anexo 7.1 para mayor información).	10
Tabla 2: Superficie englazada en la subcuenca Salar de Cauchari.	16
Tabla 3: Alturas por tipos de glaciares en la subcuenca Salar de Cauchari.	19

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

ALOS: Advanced Land Observing Satellite

ASTER: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

CBERS: China Brazil Earth Resources Satellite

ENVI: Environment for Visualizing Images

GC: Glaciar cubierto

GCGE: Glaciar cubierto con glaciar de escombros

GD: Glaciar descubierto

GDEM: Global Digital Elevation Map

GEA: Glaciar de escombros activo

GE: Glaciar de escombros

GEF: Glaciar de escombros fósil

GEI: Glaciar de escombros inactivo

Gl: Glaciar

GLIMS: Global Land Ice Measurements from Space

H media: Altura media

IANIGLA: Instituto Argentino de Nivología Glaciología y Ciencias Ambientales

ID: Código Identificador

ING: Inventario Nacional de Glaciares

INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

LANDSAT: LAND=tierra y SAT=satélite

Lat: Latitud

Long: Longitud

MDE: Modelo Digital de Elevación

MN: Manchón de nieve

PRISM: Pancromático Remoto con Sensor de Instrumento para Stereo Mapping

SAGA: System for Automated Geoscientific Analyses

SPRING: Sistema de Procesamiento de Información Georreferenciada

SRTM: Shuttle Radar Topography Mission

SSRH: Subsecretaría de Recursos Hídricos

UTM: Universal Transverse Mercator

WGMS: World Glacier Monitoring Service

1. Introducción

Argentina es uno de los pocos países del mundo que cuenta con varios miles de kilómetros cuadrados de glaciares y permafrost de montaña rico en hielo en su territorio. Según cálculos aproximados, Sudamérica tendría cerca de 25.500 km² cubiertos por glaciares, con un 15% del área total ubicada en Argentina (Williams y Ferrigno 1999; WGMS-UNEP 2007). Nuestro país ocupa el segundo lugar después de Chile, que contiene el 75% del área total de glaciares sudamericanos. Estos porcentajes colocan tanto a Chile como a la Argentina en una posición privilegiada con respecto a otros países, pero también les otorgan un mayor grado de responsabilidad para el estudio, monitoreo y protección de los glaciares en esta región del planeta. Sin embargo, a pesar de la gran extensión de hielo que existe en nuestro país y su clara importancia socio-económica, geopolítica, ambiental y científico-académica, el conocimiento actual sobre los glaciares y el ambiente periglacial en la Argentina es muy limitado. Si bien en las últimas décadas se ha avanzado significativamente en el estudio de nuestros cuerpos de hielo, aún hoy sólo un puñado de sitios han sido analizados en detalle, y en la actualidad no existe información sobre la ubicación, área total, significancia hidrológica o la historia reciente de los glaciares y geoformas periglaciales (también llamadas crioformas) a lo largo de vastas porciones de la Cordillera de los Andes.

Entre otros atributos, los cuerpos de hielo constituyen componentes cruciales del sistema hidrológico de montaña y son reconocidos como “reservas estratégicas” de agua para las zonas bajas adyacentes y gran parte de la diagonal árida del país. Si bien la nieve que se acumula cada invierno en la Cordillera de los Andes constituye la principal fuente de agua para los ríos del oeste argentino, en años “secos” o con baja precipitación nival, los glaciares tienen una contribución muy importante al caudal de los ríos andinos ya que aportan volúmenes significativos de agua de deshielo a la escorrentía ayudando a minimizar los impactos de las sequías en las actividades socio-económicas de los oasis de regadío. Por ello, la información detallada sobre el número, área y distribución espacial de los cuerpos de hielo no sólo brinda una estimación de las reservas hídricas en estado sólido existentes en las diferentes cuencas andinas, sino también información básica para conocer la capacidad reguladora de dichos cuerpos sobre los caudales de nuestros ríos en condiciones climáticas extremas.

Los glaciares de Argentina constituyen además elementos emblemáticos del paisaje andino, realzando la belleza de los principales atractivos turísticos y generando ingresos significativos para la economía nacional. El ejemplo más claro lo constituye el glaciar Perito Moreno, en el Parque Nacional Los Glaciares, provincia de Santa Cruz, que atrae a cientos de miles de turistas cada año. Los glaciares que rodean a la localidad de El Chaltén (glaciar Torre, Piedras Blancas, y de los Tres, entre otros) también constituyen importantes atractivos turísticos dentro del mismo Parque Nacional, y realzan las imponentes vistas de los cerros Torre y Monte Fitz Roy o Chaltén.

Los cuerpos de hielo cordilleranos son un excelente laboratorio natural para estudios hidrológicos, geológicos y de cambio climático. En efecto, el rápido retroceso de los glaciares en los Andes y otras regiones montañosas del mundo es generalmente considerado como uno de los signos más evidentes del calentamiento global de la superficie terrestre en las últimas décadas.

Dada la importancia que tienen los glaciares y las crioformas ricas en hielo para nuestro país, resulta imperioso desarrollar planes y estrategias de estudio y monitoreo de estas masas de hielo que permitan responder a preguntas básicas pero extremadamente relevantes como: ¿Cuántos cuerpos de hielo hay en nuestro país? ¿Qué volumen equivalente en agua tienen? ¿Qué cantidad de agua están aportando a las cuencas de nuestros ríos? ¿Qué cambios han experimentado en el pasado y qué podría esperarse en respuesta a los distintos escenarios de cambios climáticos propuestos para el siglo XXI? ¿Cómo se verán alterados por las distintas actividades humanas que se desarrollen en sus cercanías?

Conscientes de la importancia nacional y regional de los cuerpos de hielo en nuestra Cordillera, entre junio y octubre de 2010 las Honorables Cámaras de Diputados y Senadores de Argentina convirtieron en Ley un Proyecto de “Presupuestos Mínimos para la Preservación de los Glaciares y el Ambiente Periglacial”, que contempla entre otras medidas, la creación de un Inventario Nacional de Glaciares. El 28 de Octubre de 2010 fue promulgada la Ley 26.639 de “Presupuestos Mínimos para la Preservación de los Glaciares y del Ambiente Periglacial”, la cual establece:

*ARTÍCULO 1º — Objeto. La presente ley establece los presupuestos mínimos para la protección de los glaciares y del ambiente periglacial con el objeto de preservarlos como **reservas estratégicas de recursos hídricos** para el consumo humano; para la agricultura y como proveedores de agua para la recarga de cuencas hidrográficas; para la protección de la biodiversidad; como fuente de información científica y como atractivo turístico. Los glaciares constituyen bienes de carácter público.*

ARTÍCULO 2º — Definición. A los efectos de la presente ley, se entiende por glaciar toda masa de hielo perenne estable o que fluye lentamente, con o sin agua intersticial, formado por la recristalización de nieve, ubicado en diferentes ecosistemas, cualquiera sea su forma, dimensión y estado de conservación. Son parte constituyente de cada glaciar el material detrítico rocoso y los cursos internos y superficiales de agua.

Asimismo, se entiende por ambiente periglacial en la alta montaña, al área con suelos congelados que actúa como regulador del recurso hídrico. En la media y baja montaña al área que funciona como regulador de recursos hídricos con suelos saturados en hielo.

*ARTÍCULO 3º — Inventario. Créase el Inventario Nacional de Glaciares, donde se **individualizarán todos los glaciares y geoformas periglaciares que actúan como reservas hídricas existentes en el territorio nacional** con toda la información necesaria para su adecuada protección, control y monitoreo.*

ARTÍCULO 4° — Información registrada. El Inventario Nacional de Glaciares deberá contener la información de los glaciares y del ambiente periglacial por cuenca hidrográfica, ubicación, superficie y clasificación morfológica de los glaciares y del ambiente periglacial. Este inventario deberá actualizarse con una periodicidad no mayor de CINCO (5) años, verificando los cambios en superficie de los glaciares y del ambiente periglacial, su estado de avance o retroceso y otros factores que sean relevantes para su conservación.

*ARTÍCULO 5° — Realización del Inventario. El inventario y monitoreo del estado de los glaciares y del ambiente periglacial **será realizado y de responsabilidad del Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA)** con la coordinación de la autoridad nacional de aplicación de la presente ley.*

Se dará intervención al Ministerio de Relaciones Exteriores, Comercio Internacional y Culto cuando se trate de zonas fronterizas pendientes de demarcación del límite internacional previo al registro del inventario.

El IANIGLA por disposición transitoria (Artículo 15) de la Ley 26.639, creó el documento “Inventario Nacional de Glaciares y Ambiente Periglacial: Fundamentos y Cronograma de Ejecución” (IANIGLA, 2010), en donde se desarrolla la estrategia para la realización del Inventario Nacional de Glaciares. La misma cuenta con tres niveles, de menor a mayor detalle de información. El objetivo del nivel 1 es el Inventario Nacional de Glaciares propiamente dicho, es decir la identificación y caracterización de todos los glaciares y crioformas del ambiente periglacial que actúan como reservas hídricas estratégicas en la República Argentina. El nivel 2 tiene como objetivo conocer la variación temporal de los glaciares y crioformas a lo largo del país. Mientras que el objetivo del nivel 3 es establecer los factores ambientales que regulan el comportamiento y determinar la significancia hidrológica de estos cuerpos de hielo a la escorrentía andina.

El presente informe del Inventario Nacional de Glaciares corresponde a los estudios de nivel 1 en la subcuenca Salar de Cauchari, Cuencas Varias de la Puna. En el mismo se identifican, mapean y caracterizan todos los glaciares, manchones de nieve perennes y glaciares de escombros que actúan como reservas estratégicas de agua en estado sólido, atendiendo a las definiciones de la Ley 26.639, el documento “Inventario Nacional de Glaciares y Ambiente Periglacial; Fundamentos y Cronograma de Ejecución”, y el decreto 207/2011 de reglamentación de la citada Ley.

El trabajo de identificación de glaciares, manchones de nieve y glaciares de escombros en la subcuenca Salar de Cauchari fue elaborado en agosto de 2016 y aprobado según resolución N°RESOL-2018-119-APN-MAD del 16 de febrero de 2018, siguiendo lineamientos internacionales adaptados a condiciones locales y regionales. La metodología utilizada ha sido desarrollada por el IANIGLA (ver sección 4. Materiales y métodos) y sirve de base para el Inventario Nacional de Glaciares en Argentina.

Agradecemos a Esteban Siñeriz, Ricardo Moyano y Federico González por acompañarnos y ayudarnos incondicionalmente en la organización y realización en las tareas de campo.

2. Antecedentes

En el Noroeste Argentino (NOA), la criósfera está representada principalmente por el permafrost de montaña que se manifiesta topo-climáticamente por la presencia de glaciares de escombros y asociación de formas menores generadas por el congelamiento permanente o estacional del suelo. El permafrost es una condición térmica; se presenta cuando los suelos permanecen congelados por más de dos años (Van Everdingen 2005).

En el sector oriental del NOA (Cordillera Oriental, Sierras Subandinas y Sierras de Santa Bárbara), los glaciares de escombros activos son los principales indicadores de permafrost discontinuo. El permafrost discontinuo ha sido detectado tempranamente en las cabeceras de sus ríos principales, a diferentes alturas y condiciones climáticas locales (Ahumada et al. 2009). Claramente su condición térmica actual estaría en desequilibrio con el modelo climático planteado por Haeberli (1985), donde el rango de precipitación para la formación de glaciares de escombros sería de 400 a 2.500 mm anuales y el de temperatura promedio anual sería de -15 a -2° C. Considerando este modelo, los glaciares de escombros permanecerían en un equilibrio inestable y ecológicamente resilientes con las condiciones de temperatura y precipitación del clima actual (Ahumada et al. 2006).

El sector más occidental del NOA, es lo que se conoce como el ambiente de la Puna. Según Bonaparte (1978) la Puna argentina representa el extremo sudoriental de la faja andina denominada altiplano, con alturas que superan los 3.000 msnm. La Puna está surcada por cadenas montañosas y volcanes que se elevan hasta más de 6.000 msnm, con cuencas endorreicas que han originado grandes lagunas como la de Pozuelos, en la provincia de Jujuy y numerosos salares como las Salinas Grandes y Olaroz en Jujuy, de Arizaro, Pocitos y Antofalla en las provincias de Salta y Catamarca. Al oeste, la Puna argentina está separada de la chilena por las altas cumbres que definen el límite internacional con Chile, al este por la Cordillera Oriental y las Sierras Pampeanas, al norte se continúa con la Puna boliviana y al sur su límite varía según los autores. Para González Bonorino terminaría en las Sierras de Fiambalá, Catamarca (27° 15' S); para Turner en el borde austral de la Cordillera de Buenaventura, Catamarca (26° 45' S), mientras que para González y Aceñolaza llegaría hasta el noroeste de la Provincia de La Rioja (28° 30' S) (Bonaparte, 1978).

Los primeros estudios de permafrost en el NOA fueron desarrollados por Catalano (1927), quien señaló la presencia de masas rocosas aglomeradas por hielo que fluían por gravedad a modo de un glaciar, por lo que los denominó litoglaciares. En los Nevados del Acay y de Palermo – Cachi, los glaciares de escombros inventariados registraron su límite inferior a 4.500 y 4.650 msnm, respectivamente (Igarzábal 1983). En el Nevado de Quevar (6.130 msnm) y Granados (5.705 msnm) también se observaron núcleos de hielos cubiertos por detritos en las altas cumbres (Igarzábal 1983).

Asimismo, los cuerpos de hielo y nieve de la región ubicada entre los 23° y 30° de latitud sur, fue inicialmente estudiada por Lliboutry (1956). El área se caracteriza por ser extremadamente árida y los cuerpos de hielo se ubican confinados en los picos mayores a

6.000 msnm. La mayoría se encuentran en pequeños circos o nichos de nivación, y unos pocos presentan grietas o signos de movimiento. Son formados por nieve recongelada y no presentan línea de equilibrio. Los cuerpos de hielo son de tipo reservorio, es decir que, todo el cuerpo de hielo se encuentra en balance positivo (acumulación) o negativo (ablación) dependiendo de la época del año (Mercer, J. H. 1967). La gran altura que posee la cordillera de Los Andes, en esta región, produce que todas las precipitaciones sean en forma de nieve. La nieve es soplada de las cimas de las montañas y los cuerpos de hielo suelen ser solamente encontrados sobre las laderas sotavento de las grandes cumbres (Williams y Ferrigno 1999).

La presencia de glaciares en la Puna, dadas sus extremas condiciones de aridez, se limita a pequeños manchones de nieve localizados por encima de los 6.000 msnm y a glaciares de escombros dispersos en los cordones montañosos y cerros de mayor altitud. La presencia de manchones de nieve perennes en el cerro Llullaillaco (6.739 msnm) en su sector chileno, fueron identificados por Messerli (Messerli et al. 1993) (Figura 1)

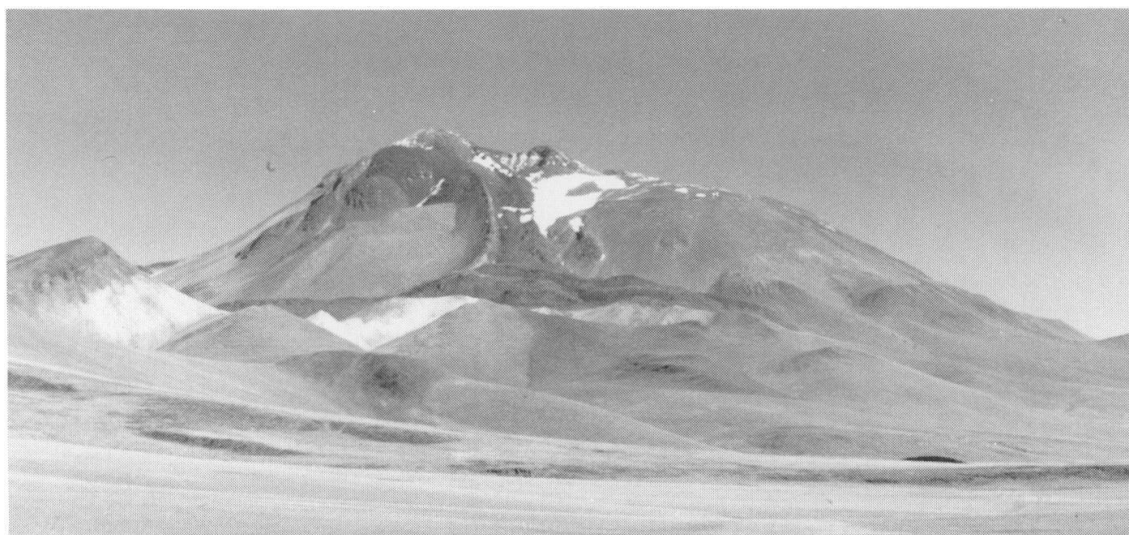


Figura 1: Cerro Llullaillaco 6.739 msnm, con manchones de nieve perennes en su sector chileno (Messerli et al 1993).

No se han encontrado estudios específicos de glaciares en el ambiente de la Puna de Argentina, como por ejemplo un inventario completo de glaciares de la Puna, tan solo algunos trabajos que incluyen pequeños sectores en su borde oriental (Glaciares de Sierra de Pastos Grandes, C° Incamayo 5.531 msnm) (Martini et al 2013, 2015). Existen trabajos de identificación de glaciares de escombros en la Sierra de Santa Victoria (Ahumada 2009, 2015), pero de nuevo sólo incluyen los de su vertiente oriental, la correspondiente a la cuenca del río Bermejo. La parte occidental corresponde a la cuenca del río Pilcomayo y subcuenca Salinas Grandes, donde dentro del marco del ING si se han inventariado glaciares de escombros.

3. Definiciones a los fines del Inventario

A los fines específicos y operativos del Inventario Nacional de Glaciares, el IANIGLA propuso en el documento: “**Inventario Nacional de Glaciares y Ambiente Periglacial: Fundamentos y Cronograma de Ejecución**”, (http://www.glaciaresargentinos.gob.ar/wp-content/uploads/legales/fundamentos_cronograma_ejecucion.pdf IANIGLA 2010) definiciones específicas y un tamaño mínimo de los cuerpos de hielo a inventariar dentro del ambiente glacial y periglacial de Argentina. El objetivo de estas definiciones es aclarar las características básicas de los diferentes cuerpos identificados en las imágenes satelitales y los procesos que las originan, para que puedan ser reconocidos por los operadores sin lugar a ambigüedades. Estos criterios han sido empleados en los inventarios de cuerpos de hielo para la subcuenca Salar de Cauchari aquí presentado.

En el territorio de la República Argentina podemos agrupar a las reservas hídricas estratégicas en estado sólido en dos grandes grupos: glaciares (descubiertos y cubiertos) y glaciares de escombros. Estos grupos contienen, tanto en volumen como en superficie cubierta, las mayores reservas hídricas en estado sólido de la cordillera. No existe en la actualidad información precisa sobre la relevancia hidrológica de otras crioformas presentes en la Cordillera de los Andes, pero se estima que la misma es significativamente inferior comparada con los glaciares (descubiertos y cubiertos) y los glaciares de escombros. Por ello se ha propuesto estudiar, a través de las investigaciones relacionadas con el Nivel 3 del Inventario Nacional de Glaciares, el aporte de los suelos congelados y otras crioformas al caudal de los ríos andinos. En el caso de establecerse que la contribución hidrológica de otras crioformas sea relevante, las mismas serán incluidas en futuros inventarios.

Si bien las definiciones que aquí se presentan son más amplias que otras utilizadas para estudios específicos, las mismas concuerdan por un lado con los lineamientos generales dados por el WGMS (World Glacier Monitoring Service) y la IPA (International Permafrost Association), y además cumplen con la propiedad principal que debe tener un cuerpo de hielo para ser incluido en el Inventario, su condición de reserva de agua en estado sólido. Es respetando estos dos conceptos, que se proponen las siguientes definiciones:

Glaciar (descubierto y cubierto): cuerpo de hielo permanente generado sobre la superficie terrestre a partir de la compactación y recristalización de la nieve, con o sin cobertura detrítica significativa, que sea visible por períodos de al menos 2 años, con evidencias de movimiento por gravedad (grietas, ojivas, morenas medias) o no (*) y de un área mayor o igual que 0,01 km² (una hectárea).

(*) Dentro de esta definición de glaciar se incluyen a **los manchones de nieve permanentes / glaciaretas** que, como no tienen evidencia de movimiento, en general no se consideran glaciares. Sin embargo, dado que los manchones de nieve permanentes / glaciaretas son reservas significativas de agua en estado sólido, se han incluido en el inventario.

Glaciar de escombros: cuerpo de detrito congelado y hielo, con evidencias de movimiento por acción de la gravedad y deformación plástica del permafrost, cuyo origen está relacionado

con los procesos criogénicos asociados con suelo permanentemente congelado y con hielo subterráneo o con el hielo proveniente de glaciares descubiertos y cubiertos, y de un área mayor o igual que 0,01 km² (una hectárea). Los glaciares de escombros dependen fuertemente del aporte de detritos, nieve y hielo.

Los glaciares de escombros se pueden clasificar por su grado de actividad en **activos, inactivos y fósiles** (Haeberli 1985; Ikeda 2004). 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 presentar cierta cobertura vegetal. El cuerpo de sedimentos que permanece una vez que el hielo se ha derretido se llama glaciar de escombros fósil (Barsch 1978; Trombotto 2003; Brenning 2005). Esta última categoría no ha sido incluida en el inventario por no tener importancia hidrológica.

Glaciar cubierto con glaciar de escombros: en los Andes Centrales existen numerosos casos en los 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 del límite entre el hielo cubierto (ambiente glaciar) y el glaciar de escombros glaciogénico (ambiente periglacial) en base a sensores remotos, en particular si no se cuenta con información adicional proveniente de estudios detallados de campo. Por ello, en las tareas de inventario se ha utilizado una categoría nueva denominada glaciar cubierto con glaciar de escombros que incluye las porciones de hielo cubierto junto con el glaciar de escombros que se desarrolla a sus costados o en su porción terminal.

Cabe aclarar que en el ambiente periglacial existen numerosas geoformas con hielo en su interior. Sin embargo, los glaciares de escombros al estar sobresaturados en hielo, son los más importantes desde el punto de vista de reserva hídrica (Corte 1976; Schrott 1996; Arenson 2010; Brenning y Azócar 2010; Azócar y Brenning 2010). Es precisamente el alto contenido de hielo el que favorece su desplazamiento pendiente abajo (Haeberli 1985; Barsch 1996). Este movimiento es el que genera los rasgos característicos superficiales (crestas y surcos, crestas laterales) que permiten identificar a los glaciares de escombros en las imágenes satelitales (Haeberli 1985; Trombotto 1991; Barsch 1996; Ikeda y Matsuoka 2002). Por otra parte, es importante aclarar que la distribución de hielo dentro de los glaciares de escombros no es homogénea, ya que existen variaciones tanto horizontales como verticales, de allí la importancia de identificar la totalidad del cuerpo (Barsch 1996; Gruber y Haeberli 2009; Arenson y Jakob 2010; Otto et al. 2010).

4. Materiales y métodos

La ejecución del Inventario Nacional de Glaciares sigue las normativas internacionales establecidas por el World Glacier Monitoring Service (WGMS 1967 y posteriores; UNESCO-IAHS 1970; Müller 1977) y su programa World Glacier Inventory (WGI), normativas del Programa Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS: Racoviteanu et al. 2009), la IPA (International Permafrost Association), y directivas empleadas en inventarios previos en los Andes Centrales y Patagónicos (Corte y Espizúa 1981; Delgado et al. 2010).

Dentro del ambiente conocido como la Puna argentina, las cuencas estudiadas en el marco del Inventario Nacional de Glaciares corresponden a la denominada como Cuencas Varias de la Puna (Fuente: <https://www.mininterior.gov.ar/obras-publicas/pdf/83.pdf>), la cual engloba un total de 11 subcuencas (IANIGLA 2010), distribuidas a lo largo de las provincias de Jujuy, Salta y Catamarca.

Dentro de estas subcuencas hay dos donde no se identificaron glaciares (http://www.glaciaresargentinos.gob.ar/?page_id=2192), son las correspondientes a Salina Jama y Laguna de Pozuelos. El resto presentan principalmente glaciares de escombros en su mayoría y algunos manchones de nieve perennes próximos a los cerros de mayor altitud. El único glaciar descubierto de toda la Puna se ubica en las proximidades del cerro Sierra Nevada de 6.173 msnm, subcuenca de salar de Antofalla. El presente informe corresponde al inventario de glaciares de la subcuenca Salar de Cauchari, que forma parte de la cuenca denominada Varias de la Puna (Figura 2).

La subcuenca de estudio presenta un largo aproximado de 80 km en sentido norte-sur, por un ancho de 35 km aproximadamente en sentido este-oeste. El área total de la zona de estudio es de 2.200 km² aproximadamente.

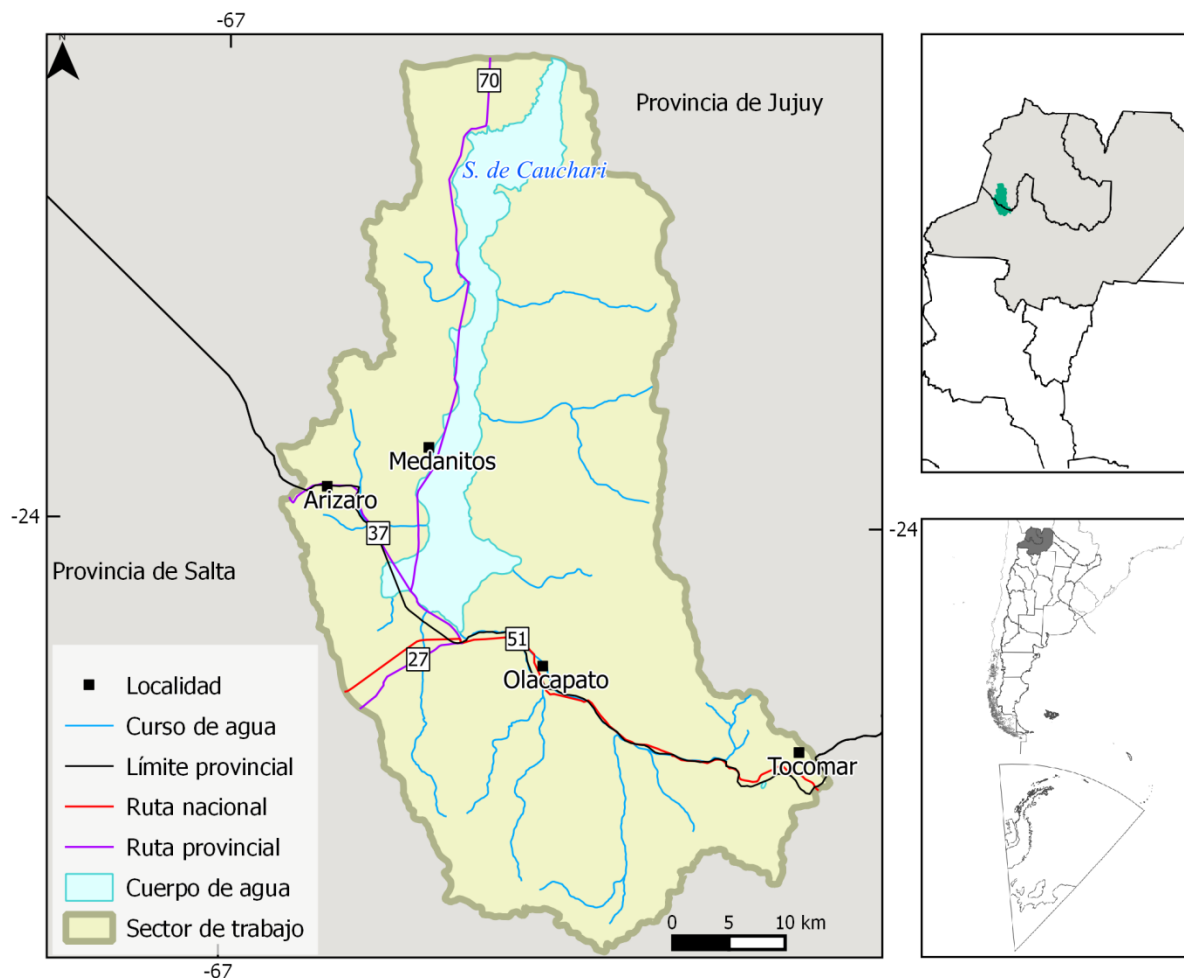


Figura 2: Mapa de ubicación de la subcuenca Salar de Cauchari.

4.1. Delimitación de cuencas hidrográficas a partir de modelos de elevación

La delimitación de cuencas hidrográficas en la subcuenca Salar de Cauchari se realizó con información proveniente del modelo digital de elevación SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), que tiene una cobertura cuasi-global y está disponible en forma libre (<http://earthexplorer.usgs.gov/>).

A través del programa QGIS (software libre) se delimitó la cuenca utilizando como base el mosaico del SRTM v4. Los pasos básicos para obtener las cuencas hidrográficas en QGIS consisten en primer lugar en el llenado de sumideros y posteriormente delimitar el tamaño mínimo de la cuenca que viene dado en base al número de celdas que seleccionemos. Cada cuenca delimitada fue posteriormente editada y corregida manualmente, en aquellos casos en que no hubo un buen ajuste entre el MDE y la imagen. La edición manual de las cuencas fue realizada empleando el programa QGIS (software libre).

4.2. Selección de imágenes satelitales y georreferenciación

Para realizar el Inventario en la subcuenca Salar de Cauchari se utilizaron como base dos imágenes SPOT5. Además se revisaron y utilizaron como apoyo imágenes CBERS y el aplicativo de Google Earth y las imágenes de Bing. Asimismo, las imágenes Landsat también fueron usadas como base de georreferenciación, mientras que las imágenes de mayor resolución espacial (CBERS2-HRC) fueron importantes para la detección de glaciares de escombros (ver anexo 7.1 donde se adjunta información de todas las imágenes empleadas para la realización de este inventario).

Las imágenes LANDSAT fueron provistas gratuitamente por el USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS). Las imágenes CBERS fueron obtenidas gratuitamente desde la página del Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) de Brasil (<http://www.inpe.br>).

Para la selección de imágenes se siguieron las sugerencias establecidas por GLIMS que tienen en cuenta la disponibilidad de imágenes, ausencia de nubes y cobertura de nieve. Para minimizar posibles errores que introduce la cobertura de nieve y dificulta la delimitación de los cuerpos de hielo, se eligieron imágenes de la época con menores precipitaciones (de abril a octubre), dado que en las montañas del NOA el 80% de las precipitaciones están concentradas en los meses estivales (diciembre – febrero. Minetti et al. 2005), con menos frecuencia en los invernales (agosto).

Tabla 1: Imágenes de los sensores utilizadas como base para el Inventario de la subcuenca Salar de Cauchari (ver anexo 7.1 para mayor información).

Satélite/sensor	ID imagen	Fecha
SPOT5-HRG2	SPOT5_HRG2_2012-04-07_14-47-35_J_676_398	07 abril 2012
SPOT5-HRG2	SPOT5_HRG2_2012-10-22_14-33-56_J_675_399	22 octubre 2012

En este trabajo, las coordenadas están referidas al sistema de referencia global WGS84, y el sistema de proyección elegido es el UTM (Universal Transversal Mercator). Este sistema de referencia y proyección es utilizado internacionalmente, lo que permitirá comparar los resultados obtenidos en el presente trabajo con información de otros países. Las superficies están expresadas en kilómetros cuadrados y como superficies proyectadas en un plano horizontal, mientras que las altitudes están expresadas en metros sobre el nivel medio del mar (msnm).

En algunas imágenes se corrigieron las variaciones en la georreferenciación utilizando como base una imagen LANDSAT 5 TM. Estas imágenes, generadas por el USGS (United States Geological Survey) son internacionalmente aceptadas como base de referencia (Tucker et al. 2004). El procedimiento de georreferenciación se realizó con el software gratuito QGIS.

En la Figura 3 se puede observar un diagrama de flujo con la metodología general implementada para la realización del Inventario.

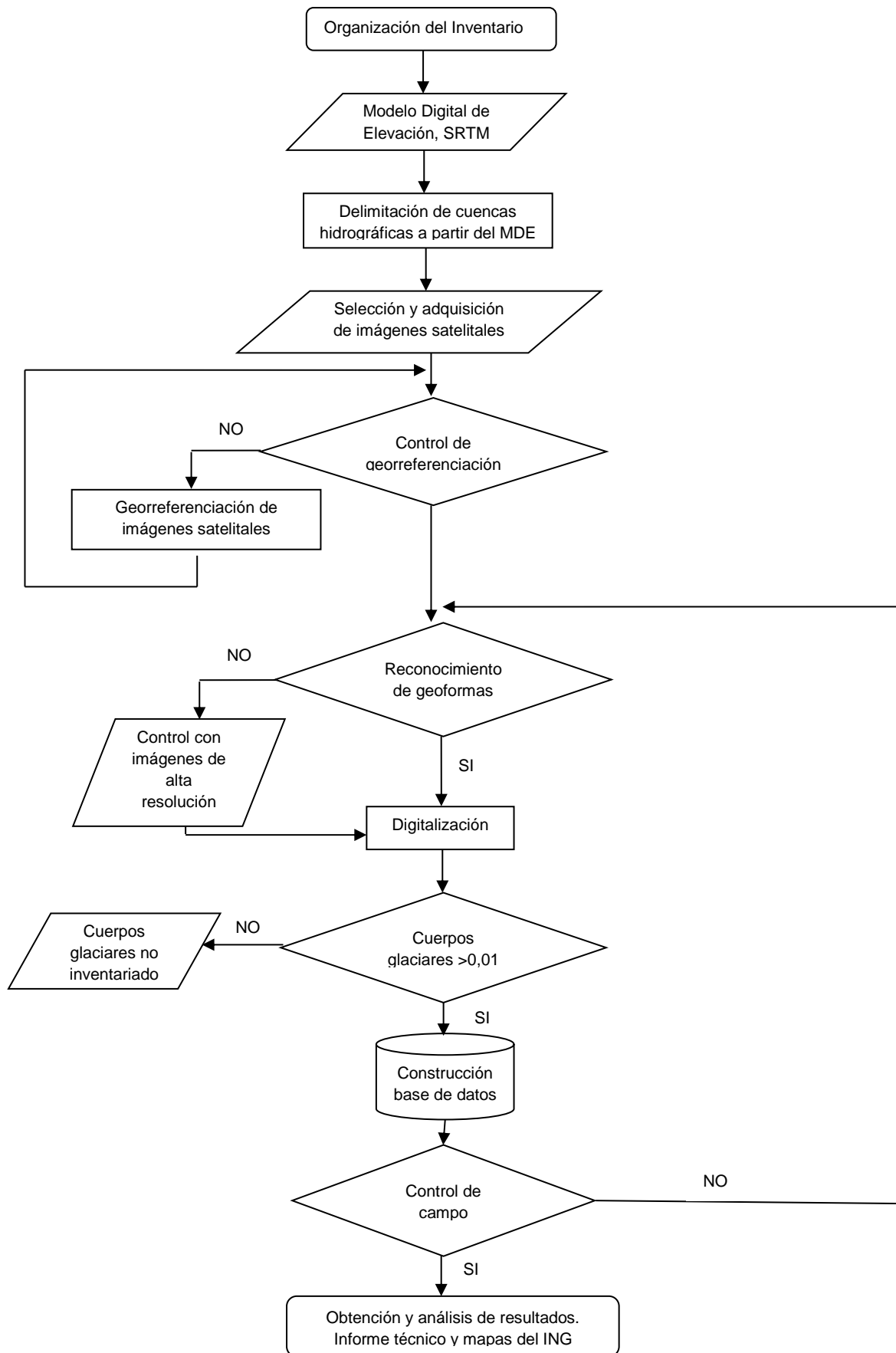


Figura 3: Diagrama de flujo de la metodología usada.

4.3. Delimitación del hielo descubierto

En esta cuenca, no se han identificado glaciares descubiertos o manchones de nieve perennes, por lo que no se ha realizado clasificación automática.

4.4. Digitalización de glaciares cubiertos y glaciares de escombros

En el caso del mapeo para glaciares cubiertos de detrito y glaciares de escombros, la digitalización manual sigue siendo la mejor 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. Para ello, además de las imágenes empleadas como base (Tabla 1), utilizamos en función de su disponibilidad, imágenes de alta resolución espacial PRISM (ALOS), HRC (CBERS 2) y las imágenes disponibles en Google Earth y Bing. La digitalización fue realizada con la utilización del programa QGIS (Figura 4).

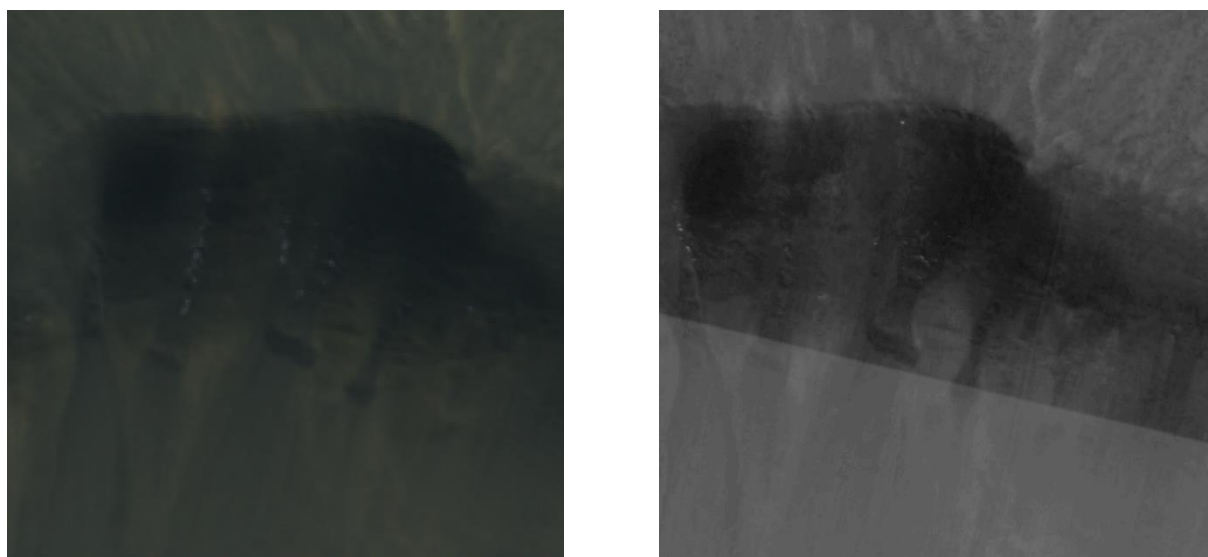


Figura 4: Ejemplo de la importancia de la resolución espacial de las imágenes en la identificación de crioformas. En la parte izquierda puede observarse un glaciar de escombros en una imagen SPOT5 (10 m de resolución). A la derecha se pueden apreciar las mismas crioformas con mucha mayor claridad, en una imagen CBERS 2 de 2,5 m de resolución espacial.

4.5. Base de datos de las geoformas inventariadas

La base de datos del Inventario Nacional de Glaciares de la subcuenca Salar de Cauchari incluye la identificación de cada uno de los glaciares, su clasificación morfológica, y parámetros de índole física tales como área, altura máxima, media y mínima, orientación, pendiente y largo total (ver Anexo 7.3). La base de datos también se construyó con la utilización del programa QGIS.

Para clasificar los glaciares se usaron las normativas internacionales en uso (principalmente del WGMS y GLIMS) con algunas adaptaciones, debido a las particularidades de los cuerpos de hielo presentes mayormente en los Andes Centrales de Argentina. En esta región en

particular, los glaciares de escombros representan un recurso hídrico de gran importancia, no obstante se han identificado este tipo de geoformas en las diferentes regiones de los Andes argentinos. Las clasificaciones internacionales fueron ampliadas para incorporar este tipo de glaciares y sus características.

La clasificación morfológica se basa en la forma y características propias de los cuerpos de hielo. Basándonos en GLIMS las formas primarias son:

0. Incierto
1. Sábana de hielo continental
2. Campo de hielo
3. Calota de hielo
4. Glaciar de descarga
5. Glaciar de valle
6. Glaciar de montaña
7. Manchón de nieve permanente y/o glaciarete
8. Barrera de hielo
9. Glaciar de escombros
10. Corriente de hielo

Más detalles sobre la clasificación de los cuerpos de hielo se encuentran en la página web http://www.glims.org/MapsAndDocs/assets/GLIMS_Glacier-Classification-Manual_V1_2005-02-10.pdf

Según GLIMS un glaciar o masa de hielo perenne identificado por un único ID (código identificador), consiste en un cuerpo de hielo y nieve que se observa al final de la estación de ablación o en el caso de los glaciares tropicales cuando no hay nieve transitoria. Esto incluye como mínimo todos los tributarios y masas de hielo que contribuyen a la alimentación del glaciar principal, además de las partes cubiertas de detrito. Según estos lineamientos quedan excluidos los afloramientos rocosos y nunataks. Ver definición en:

http://www.glims.org/MapsAndDocs/assets/GLIMS_Analysis_Tutorial_a4.pdf.

El código internacional **ID_GLIMS** de un glaciar es generado a partir de las coordenadas geográficas de un punto ubicado en el interior del mismo. Cuando las longitudes corresponden al Oeste, las mismas son convertidas al Este mediante la adición de 360 grados ($-69.232+360 = 290.768$). De esta manera se facilita el acceso de la información del inventario a un nivel internacional de referencia.

Hay que aclarar que en algunos casos las geoformas glaciarias descritas en este informe, pueden estar compuestas por secciones de más de un tipo de glaciar (por ejemplo descubierto, cubierto y de escombros) formando parte de una sola unidad glaciar, con un único ID. Por esta razón el número de glaciares no coincide estrictamente con el número de polígonos de hielo observados en el mapa.

Por tanto, el ID de un glaciar es un código de carácter único que representa a cada uno de los glaciares inventariados. Para ello hemos definido un código **ID_local** que consiste en las

coordenadas geográficas de un punto ubicado en el interior de cada geoforma (similar al ID_GLIMS salvo que en el caso del ID_local la longitud está referida al Oeste). Las coordenadas son expresadas en grados decimales de longitud Oeste y latitud Sur.

La información de posición de cada geoforma viene dada por un código de cuenca, que provee información sobre la provincia, la cuenca y sub-cuencas donde se encuentra el cuerpo de hielo inventariado. El código de las provincias es el indicado por la norma ISO 3166, donde por ejemplo la provincia de Jujuy es identificada con la “Y” mientras que el código de cuenca es el indicado por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SSRH, <http://www.hidricosargentina.gov.ar>).

4.6. Control de campo

Los glaciares argentinos se ubican a lo largo de la Cordillera de los Andes, en lugares inaccesibles, a gran altura y en zonas carentes de infraestructura vial, por lo que aun hoy encontramos zonas montañosas inexploradas. Las campañas del nivel 1 del ING tienen como objetivo relevar y documentar la presencia y el estado de glaciares, particularmente de aquellos para los que no existe o se tiene muy poca información. Además de obtener información en forma directa se busca generar un banco fotográfico que servirá para dar a conocer y monitorear un gran número de glaciares.

5. Resultados

5.1. Subcuenca Salar Cauchari

La zona de estudio, limita en su parte occidental con la Salina del Rincón (perteneciente a la subcuenca Salar Arizaro), a través de una sierra denominada Alto de Arizaro, con una orientación es en sentido norte sur y alturas que superan los 4.700 msnm. Hacia el sur se ubican los cerros Nevado de Queva (6.102 msnm), El Gallo (5.116 msnm), Verde (5.436 msnm) y Agua Caliente (5.397 msnm), los cuales lo separan de la subcuenca Salar Pocitos. Al este, la sierra conformada por los cerros Alto la Aguada (4.605 msnm), Angosto de Sijes (4.915) y Colorado (5.223) los separan de la subcuenca Salinas Grandes. Al norte limita con la subcuenca de Olaroz.

La subcuenca de estudio se caracteriza por presentar glaciares de escombros situados principalmente alrededor del Nevado de los Pastos Grandes, donde se ubican los cerros Olagapato Grande (4.764 msnm) y Nevado de Queva (6.102 msnm). Los cuerpos de hielo se emplazan por encima de los 4.600 msnm.

La superficie de la subcuenca Salar de Cauchari es de 2.200 km² aproximadamente, de los cuales 0,38 km² están cubiertos por masas de hielo, es decir un 0,017 % de la cuenca está cubierta por glaciares (Tabla 2). El total de geoformas inventariados en la cuenca de estudio es de 15 cuerpos (Figura 11). En la Figura 5 se puede observar el mapa correspondiente al inventario de la subcuenca salar Cauchari.

Tabla 2: Superficie englazada en la subcuenca Salar de Cauchari.

Tipo de geoforma inventariada	Área (km²)
Glaciar de escombros activo	0,08
Glaciar de escombros inactivo	0,30
Total	0,38

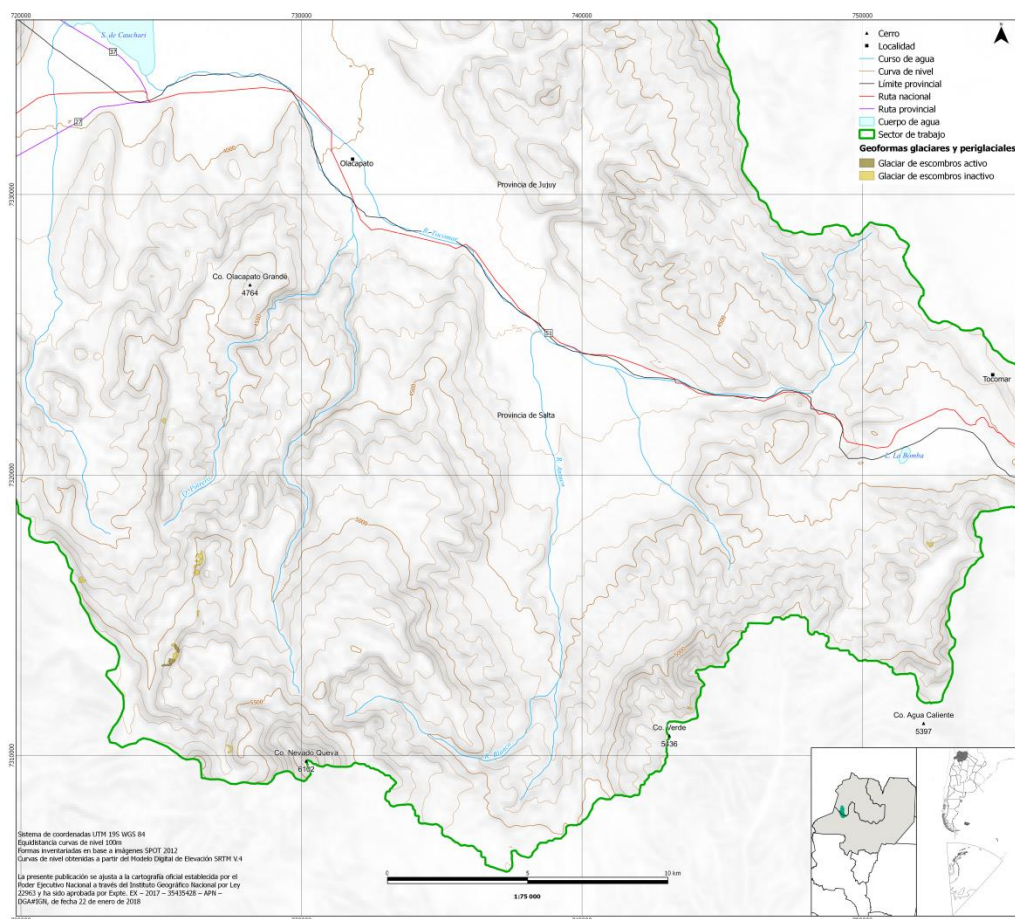


Figura 5: Cuerpos de hielo en la subcuenca Salar de Cauchari.

En esta subcuenca sólo se han identificado glaciares de escombros. El 79% corresponde a glaciares de escombros inactivos y el resto a activos. (Figura 6).

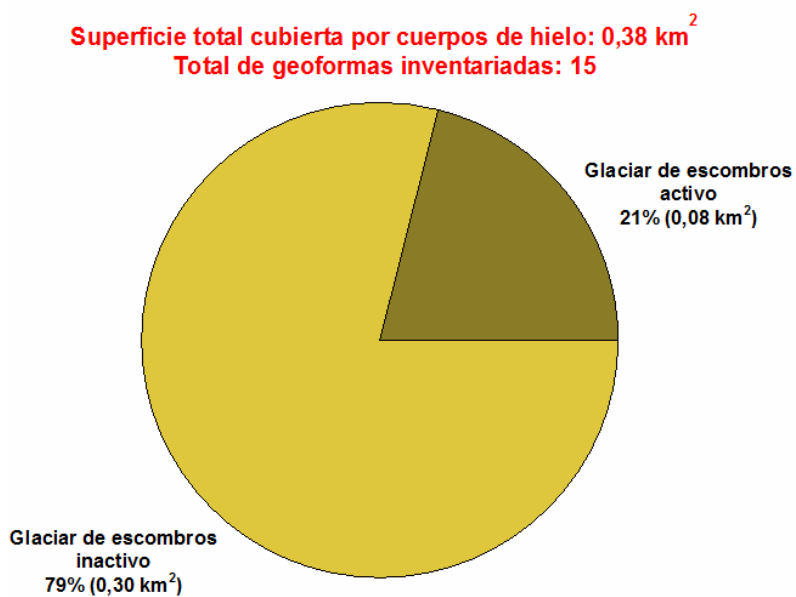


Figura 6: Distribución de los cuerpos de hielo inventariados, subcuenca Salar de Cauchari.

La orientación de los cuerpos inventariados es predominantemente hacia el oeste (Figura 7). Si bien la mayoría de los manchones de nieve y glaciares de escombros están asociados a las altas cumbres y sus alrededores, éstas se distribuyen principalmente sobre las laderas orientales de los grandes macizos montañosos.

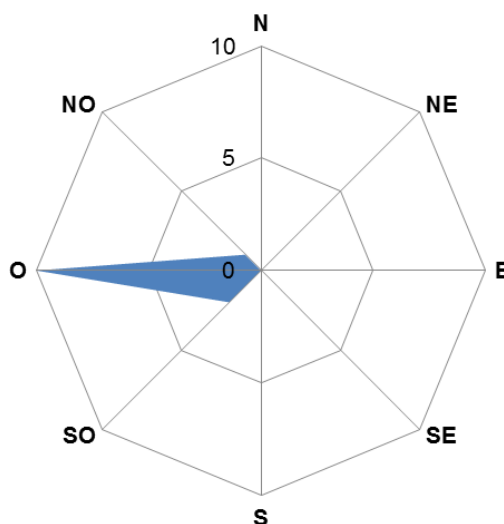


Figura 7: Orientación de los cuerpos de hielo inventariados en la subcuenca Salar de Cauchari.

En cuanto a la distribución relativa por tamaño de los distintos cuerpos de hielo, se observó que el 73% de los glaciares presentan un área entre 0,02-0,04 km² (Figura 8). El resto se distribuye entre las clases de área 0,01-0,02 km².

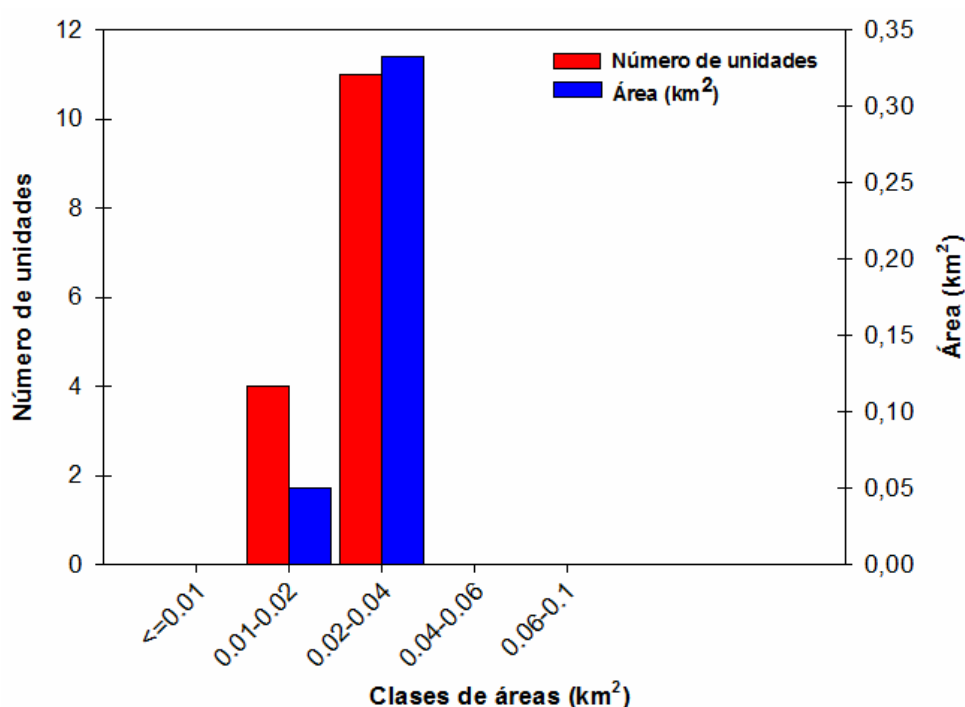


Figura 8: Distribución del número y superficie de los cuerpos de hielo inventariados por áreas en la subcuenca Salar de Cauchari.

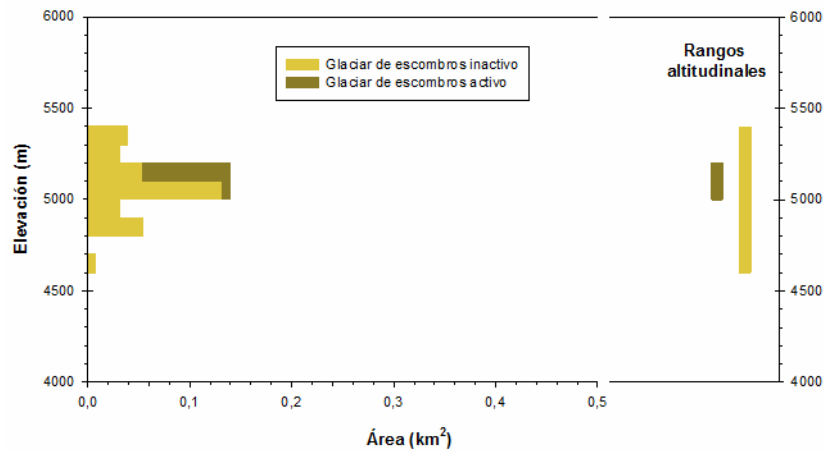


Figura 9: Hipsometría de los cuerpos de hielo, subcuenca Salar de Cauchari.

Los glaciares de escombros se ubican alrededor de los 5.000 msnm. Los glaciares de escombros inactivos llegan a una cota inferior de 4.645 msnm, pero tanto los glaciares de escombros activos como inactivos superan los 5.000 metros de altitud. Los detritos que conforman los glaciares de escombros protegen al cuerpo de hielo de las elevadas radiaciones solares, muy características de la zona de estudio, disminuyendo la ablación y permitiendo, de esta manera, la presencia de estas masas de hielo sobre cotas más bajas. (Figura 9 y Tabla 3).

Tabla 3: Alturas por tipos de glaciares en la subcuenca Salar de Cauchari.

Tipo de glaciar	Altura mínima observada (msnm)	Altura máxima observada (msnm)
Glaciar de escombros activo	5.002	5.205
Glaciar de escombros inactivo	4.645	5.395

5.2. Control de campo

El control en el terreno, correspondiente a la subcuenca Salar de Cauchari, fue realizado entre el 28 de noviembre y el 10 de diciembre de 2017. En ella se observaron las geoformas ubicadas alrededor del Nevado Queva (6.102 msnm) y cerro Agua Caliente (5.397 msnm).

Durante las tareas de control de campo se relevaron 12 geofomas de las 15 inventariadas para la subcuenca Salar de Cauchari (80%). Para mayor detalle en el anexo 7.2. se describen las geoformas visitadas durante los trabajos de campo.

6. Bibliografía

Ahumada, A. L., Ibáñez Palacios, G. P., Páez S. V. 2006. Rock Glaciers in the Andean Criolithozone at the 27° S. Symposium on Climate Change: Organizing the Science for the American Cordillera (CONCORD). NOAA-IANIGLA-CONICET-mri-IAI-MAB-IHDP-UNESCO-PHI-FORECOS.Libro de Resúmenes, Mendoza, Argentina.

Ahumada, A. L., Ibáñez Palacios, G. P., Páez S. V. 2009. El permafrost andino, reducto de la criósfera en el borde oriental de la Puna, NO de Argentina. XXIV Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas y Primer Taller de Trabajo de Estaciones Continuas GNSS de América Latina y del Caribe. Libro de Resúmenes CONICET-AGENCIA-UNC-Asociación argentina de geofísicos y geodestas, Mendoza.

Ahumada, A. L., Palacios Ibáñez, G., Carilla, J., Toledo, M.A. y Páez, M.V. 2015. Observaciones geomorfológicas en glaciares de escombros de los Andes tropicales de Argentina. Acta geológica lilloana 27 (2): 63-76.

Arenson, L. y Jakob, M. 2010. The Significance of Rock Glaciers in the Dry Andes – A Discussion of Azócar and Brenning (2010) and Brenning and Azócar (2010). Permafrost and Periglacial Processes, 21: p. 286 - 288.

Azócar, G.F. y Brenning, A. 2010. Hydrological and Geomorphological Significance of Rock Glaciers in the Dry Andes, Chile (27°- 33°S). Permafrost and Periglacial Processes, 21:p.42-53.

Barsch, D. 1978. Active rock glaciers as indicators for discontinuous alpine permafrost. An example from the Swiss Alps. Third International Conference on Permafrost, Ottawa, Canada.Proceedings, 1: p. 349-353.

Barsch, D. 1996. Rockglaciers. Springer, Berlin: 331 pp.

Bonaparte, J. 1978. El mesozoico de América del Sur y sus tetrápodos. Opera Lilloana 26. Univ. Nac. de Tucumán, Fund. Miguel Lillo, Tucumán, Argentina.

Brenning, A. 2005. Geomorphological, hydrological and climatic significance of rock glaciers in the Andes of central Chile (33–35° S). Permafr. Periglac. Process. 16: p. 231–240.

Brenning, A. y Azócar, G.F. 2010. Statistical analysis of topographic controls and multispectral signatures of rock glaciers in the dry Andes, Chile (27°- 33°S). Permafrost and Periglacial Processes, 21: p. 54 - 66.

Catalano, L. R. 1927. Datos hidrológicos del desierto de atacama. Boletín de la Dirección General de Minas, Geología e Hidrología. Publicación 35:1-35.

Corte, A. 1976. Rock glaciers. Biuletyn Peryglacjalny, 26: p. 175-197.

Corte, A. 1976. The hydrological significance of rock glaciers. Journal of Glaciology, 17: p.157-158.

- Corte, A. y Espizúa, L.E. 1981. Inventario de glaciares de la cuenca del río Mendoza. IANIGLA-CONICET, Mendoza; 64 pp.
- Delgado, S., Masiokas, M., Pitte, P. y Villalba R. 2010. Developing an Argentinean glacier inventory: first results from the Southern Patagonia Icefield submitted to GLIMS. International Ice and Climate Conference, Valdivia, Chile, CECS.
- Gruber, S. y Haeberli, W. 2009. Mountain Permafrost, in Permafrost Soils (ed) R. Margesin, Soil Biology 16. Springer-Verlag Berlin: p. 33-44p.
- Haeberli, W. 1985. Creep of mountain permafrost: internal structure and flow of alpine rock glaciers. Mitt. d. Versuchsanstalt f. Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Vol. 77: p. 142.
- IANIGLA. Inventario Nacional de Glaciares y Ambiente Periglacial: Fundamentos y Cronograma de Ejecución, (2010) Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA), Centro Científico Tecnológico – CONICET Mendoza.
- Igarzábal A. 1983. El sistema glaciológico de la cuenca superior del Río Juramento, provincia de Salta. En VIII Congreso Geológico Argentino - Actas IV; 167-183.
- Ikeda, A. y Matsuoka, N. 2002. Degradation of Talus-derived Rock Glaciers in the Upper Engadin, Swiss Alps. Permafrost Periglac. Process., 13: p. 145–161.
- Ikeda, A. 2004. Rock glacier dynamics near the lower limit of mountain permafrost in the Swiss Alps.
- Lliboutry, L. 1956. Nieve y glaciares de Chile. Fundamentos de glaciología. Santiago, Chile, Ediciones de la Universidad de Chile. 471.
- Martini, M., Strelin, J. y Astini, R. 2013. Inventario y caracterización morfoclimática de los glaciares de roca en la Cordillera Oriental argentina (entre 22° y 25° S). Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 30, núm. 3, 2013, p. 569-581.
- Martini, M., Strelin, J. y Astini, R. 2015. Distribución y caracterización de la geomorfología glaciar en la Cordillera Oriental de Argentina. Acta geológica lilloana 27 (2): 105–120, 2015.
- Mercer, J.H. 1967. Southern Hemisphere Glacier Atlas. US Army Natick Laboratories Technical report 67-76-ES.325.
- Messerli, B., Grosjean, M., Bonano, G., Bürgi, A., Geyh, M.A., Graf, K., Ramseyer, K., Romero, H., Schotterer, U., Schreier, U. and Vuille, M. 1993. Climate change and natural resource dynamics of the Atacama Altiplano during the last 18.000 years. A preliminary synthesis. Mountain Research and Development, Vol. 13, N°2, pp. 117-127.
- Minetti, J. L., Poblete, A.G, Longhi, F. 2005. Los mesoclimas del NOA. Capítulo 11. En (eds. J.L. Minetti) EL clima del NO Argentino. Ediciones Magna. p: 217 – 234.

- Minetti, J.L. y M. Leiva, 2005.. Variabilidad y cambio climático en el Noroeste Argentino. Capítulo 12. En (eds. J.L. Minetti) EL clima del NO Argentino. Ediciones Magna. p: 235-256.
- Müller, F. et al. 1977. Instructions for compilation and assemblage of data for a World Glacier Inventory. TTS/WGI, Department of Geography, ETH. Zurich.: p. 19.
- Otto, J-Ch., Götz, J., Keuschnig, M., Hartmeyer I., Trombotto D. y Schrott, L. 2010. Geomorphological and geophysical investigation of a complex rock glacier system - Morenas Coloradas valley (Cordon del Plata, Mendoza, Argentina). Geophysical Research Abstracts, EGU2010-3625, Vol. 12.
- Racoviteanu, A.E., Paul, F., Raup, B., Khalsa, S.J.S. y Armstrong, R. 2009. Challenges and recommendations in mapping of glacier parameters from space: results of the 2008 Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS) workshop, Boulder, Colorado, USA. Annals of Glaciology 50 (53).
- Schrott, L. 1996. Some geomorphological-hydrological aspects of rock glaciers in the Andes (San Juan, Argentina). Zeitschrift für Geomorphologie NF Suppl.-Bd., 104: p. 161-173.
- Stokes, C. R., Popovnin, V., Aleynikov, A., Gurney, S. D. y Shahgedanova, M. 2007. Recent glacier retreat in Caucasus Mountains, Russia, and associated increase in supraglacial debris cover and supra-proglacial lake development. Annals of Glaciology, 46: p. 95-213.
- Trombotto, D. 1991. Untersuchungen zum periglazialen Formenschatz und zu periglazialen Sedimenten in der 'Lagunita del Plata', Mendoza, Argentinie. ("Investigaciones sobre geoformas y sedimentos periglaciales en la 'Lagunita del Plata', Mendoza, Argentina"). Heidelberger Geographische Arbeiten, Heft 90: 171 páginas, Heidelberg, Alemania (ver en www.geog.uni-heidelberg.de/hga).
- Trombotto, D. 2003. Mapping of permafrost and the periglacial environments, Cordón del Plata, Argentina. Eighth International Conference on Permafrost, ICOP, Zürich, Suiza.
- Tucker, C.J. et al. 2004. NASA's global orthorectified Landsat data set. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 70(3): p. 313-322.
- UNESCO-IASH. 1970. Perennial ice and snow masses. A guide for compilation and assemblage of data for a world inventory. Technical papers in hydrology 1. UNESCO. France. 56 pp.
- Van Everdingen, R. 2005. Multilanguage glossary of permafrost and related ground-ice terms. Boulder, Co: National Snow and Ice data center / World Data Center for Glaciology. 90 pp.
- WGMS. 1967. Fluctuations of glaciers 1959-1965, Vol. I. IAHS (ICSU)/UNEP/UNESCO. Paris. 52 pp.
- WGMS, 2007. Global Glacier Changes: Facts and Figures, World Glacier Monitoring Services, United Nations Environmental Programme, Geneva.

Williams, R.S. y Ferrigno, J.G. (eds.) 1999. Satellite Image Atlas of Glaciers of the World – South America. USGS Professional Paper 1386-I.

7. Anexos

7.1. Imágenes utilizadas en el inventario de la subcuenca Salar de Cauchari

Se presentan las tablas, ordenadas por tipo de satélite, con las imágenes utilizadas en el inventario de la subcuenca Salar de Cauchari.

Para las imágenes que se utilizaron como base del inventario, la selección final se realizó teniendo en cuenta aquellas de fechas más recientes, que tuvieran poca cobertura de nieve estacional y ausencia de nubes.

El resto de las imágenes se seleccionaron teniendo en cuenta diversos objetivos:

- Como base de georreferenciación, se emplearon en este caso imágenes del satélite Landsat.
- Para identificar manchones de nieve perenne se emplean imágenes de por lo menos dos años anteriores a la imagen utilizada como base para el inventario. Pueden ser de cualquier satélite, y también deben corresponder a fechas próximas al fin del verano para minimizar la existencia de la nieve estacional.
- Como ayuda para la interpretación y digitalización del hielo cubierto y glaciares de escombros, se suelen emplear imágenes de sensores de alta resolución.

Satélite: **LANDSAT 5**

Sensor: TM (Thematic Mapper)

Resolución espacial: 30 m

Proveedor: USGS <http://www.usgs.gov>

ID imagen	Fecha	Objetivo
LT52320772010311CUB00	07 noviembre 2010	Base georreferenciación
LT52320772009308CUB01	04 noviembre 2009	Comparación manchones de nieve

Satélite: **CBERS 2B** (China Brasil Earth Resources Satellite)

Sensor: HRC (High-Resolution Panchromatic Camera)

Resolución espacial: 2,5 m

Proveedor: Imágenes de INPE <http://www.inpe.br>

ID imagen	Fecha	Objetivo
CBERS_2B_HRC_20080820_175_D_127_3	20 agosto 2008	Apoyo para delimitación de glaciares de escombros

Satélite: **SPOT** (Satellite Pour l'Observation de la Terre)
Sensor: HRG2 (Visible & Infrared High Resolution)
Resolución espacial: 5 m.
Proveedor: Imágenes gentileza CONAE (Argentina).

ID imagen	Fecha	Objetivo
SPOT5_HRG2_2013-10-16_14-13-40_A_675_398	16 octubre 2013	Apoyo para delimitación de glaciares de escombros
SPOT5_HRG2_2012-04-07_14-47-35_J_676_398	07 abril 2012	Base inventario
SPOT5_HRG2_2012-10-22_14-33-56_J_675_399	22 octubre 2012	Base inventario

7.2. Control de campo en la subcuenca Salar de Cauchari

7.2.1 Objetivos

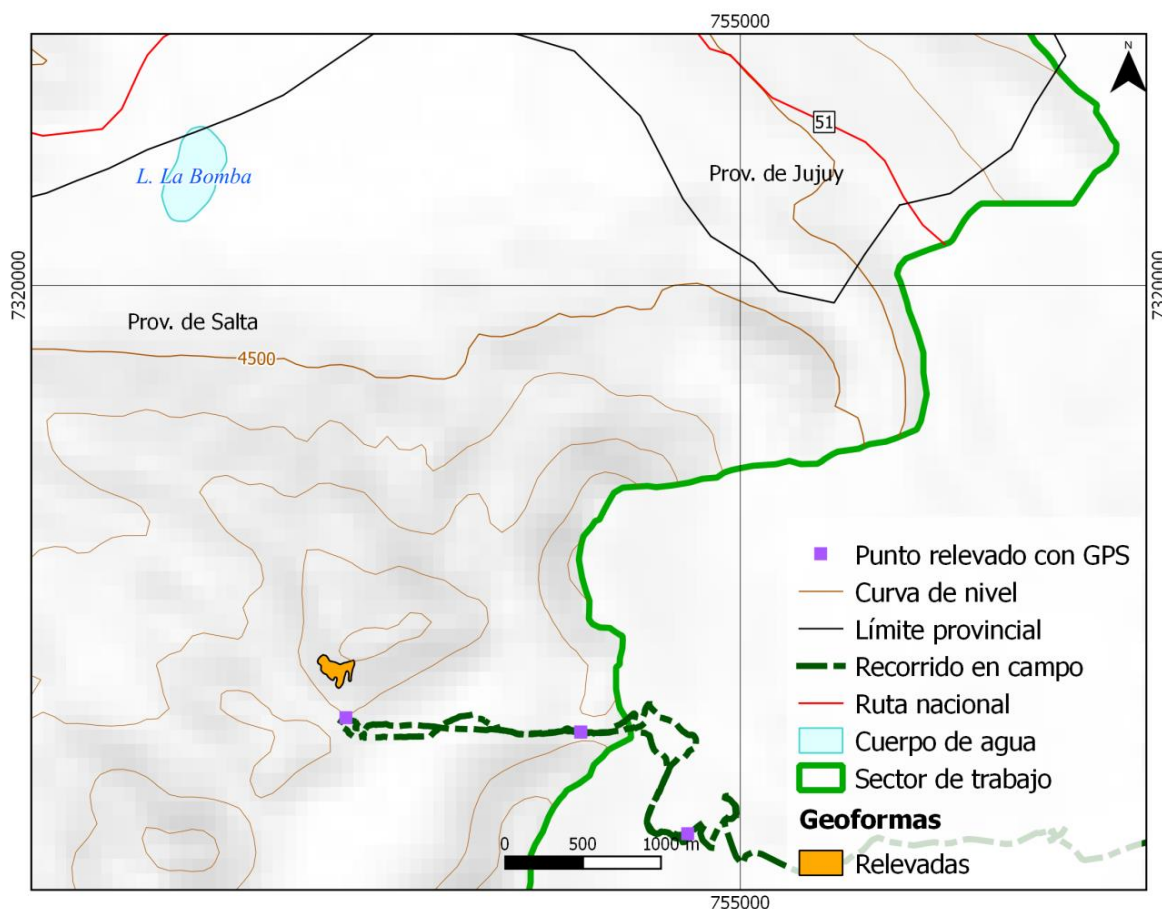
Los objetivos de la campaña fueron:

- ✓ Identificar en el campo las geoformas inventariadas en gabinete a partir de imágenes satelitales
- ✓ Observar detalles morfológicos de las geoformas
- ✓ Verificar la clasificación de glaciares realizada
- ✓ Tomar fotografías de las diferentes geoformas
- ✓ Tomar puntos de referencia y tracks con equipos GPS
- ✓ Tomar puntos y tracks con navegador GPS

7.2.2. Resultados. Geoformas relevadas

Cada sector visitado está acompañado por un mapa de ubicación donde se pueden observar las geoformas que fueron observadas en el terreno. Además se pueden ver fotos y una breve descripción característica para cada una de ellas.

Sector sureste

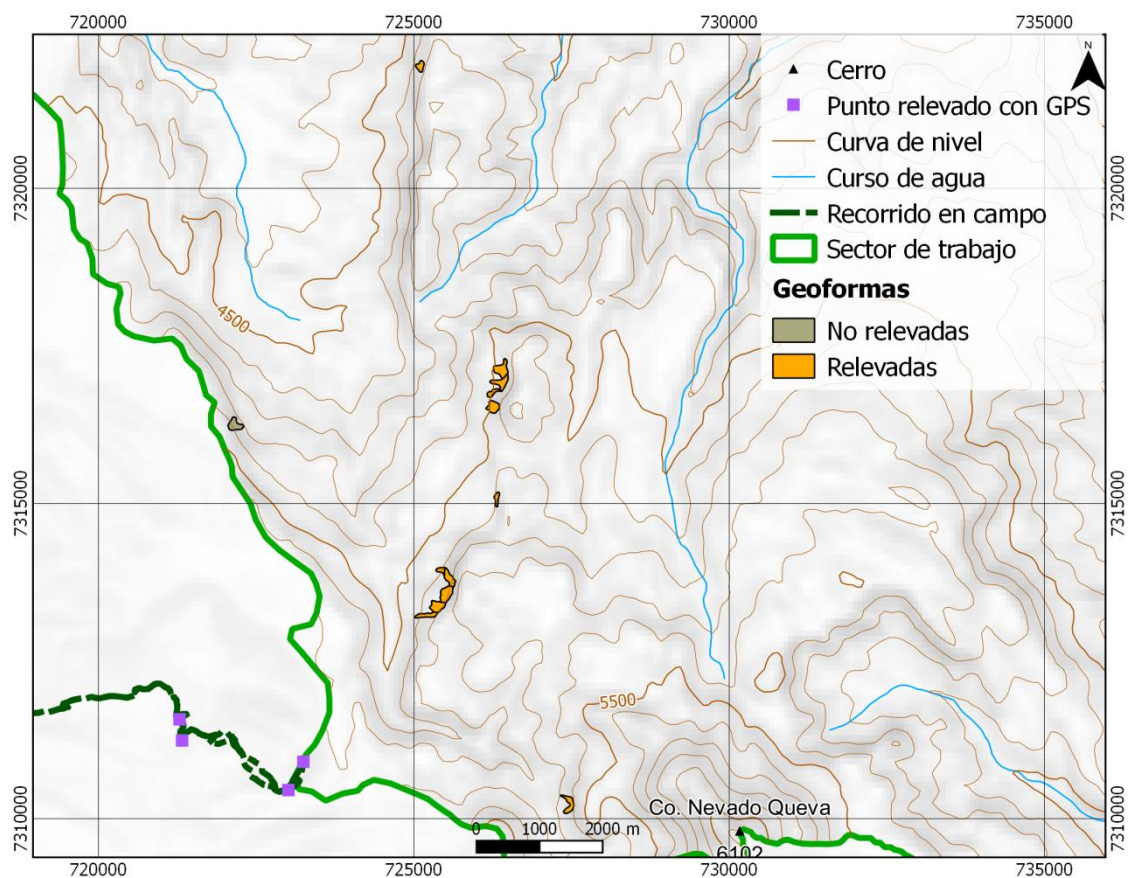


Geoforma G665144O242348S

Glaciar de escombros inactivo multiunidad y multiraíz. En gabinete había sido considerado inactivo en concordancia con lo que se observó en el campo.

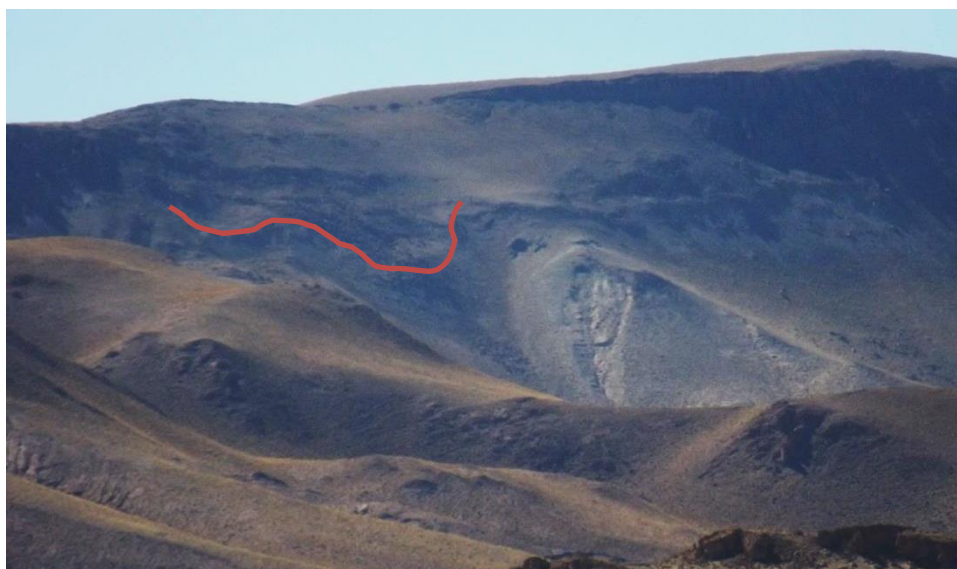


Sector suroeste



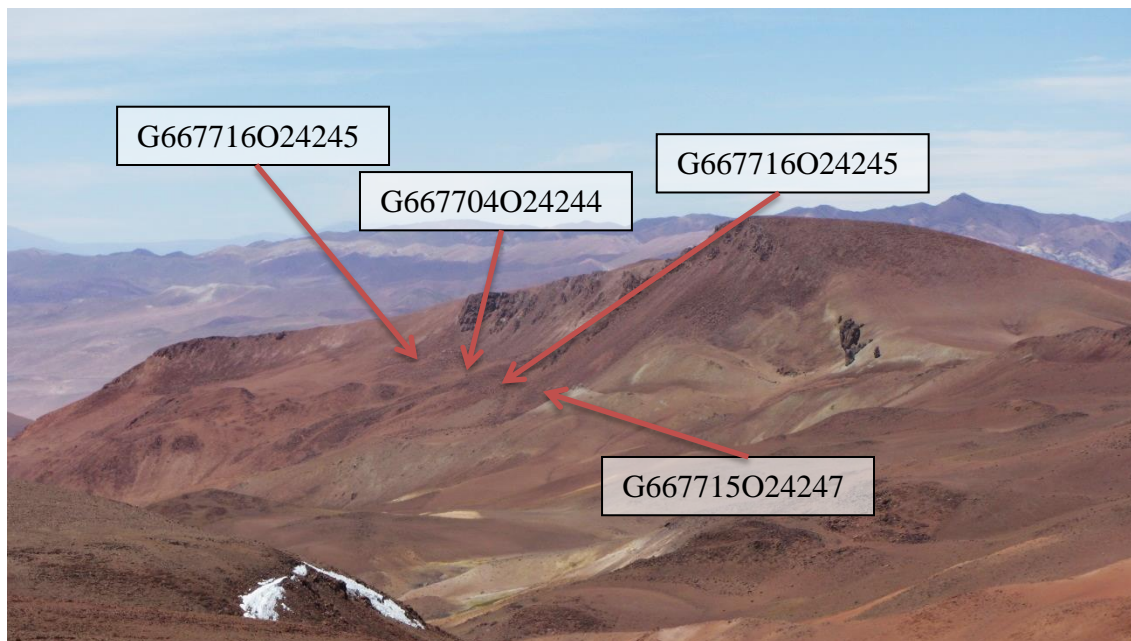
Geoforma G667838O241992S

Glaciar de escombros inactivo. La interpretación realizada en gabinete coincide con lo observado en el campo como se puede apreciar en la foto a continuación.

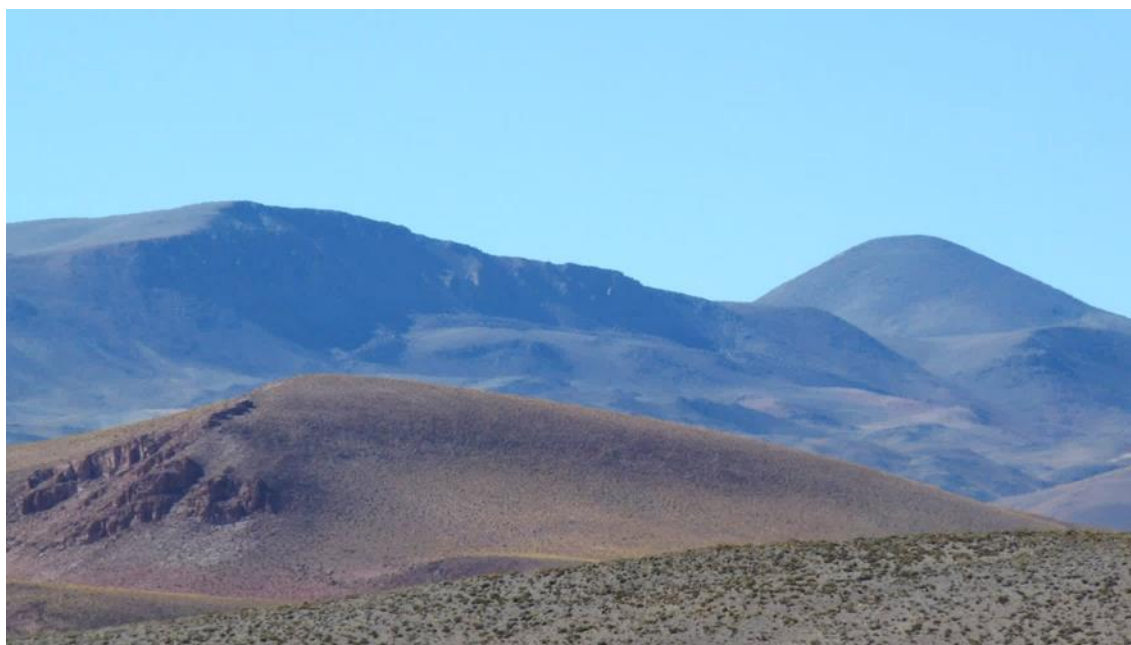


Geoformas G667716O242457S, G667703O242424S, G667704O242443S, G667715O242478S

Estos cuatro glaciares de escombros inactivos fueron observados a la distancia. Sin embargo se alcanza a apreciar características típicas de estas formas tales como una superficie colapsada y taludes menores a 35°.

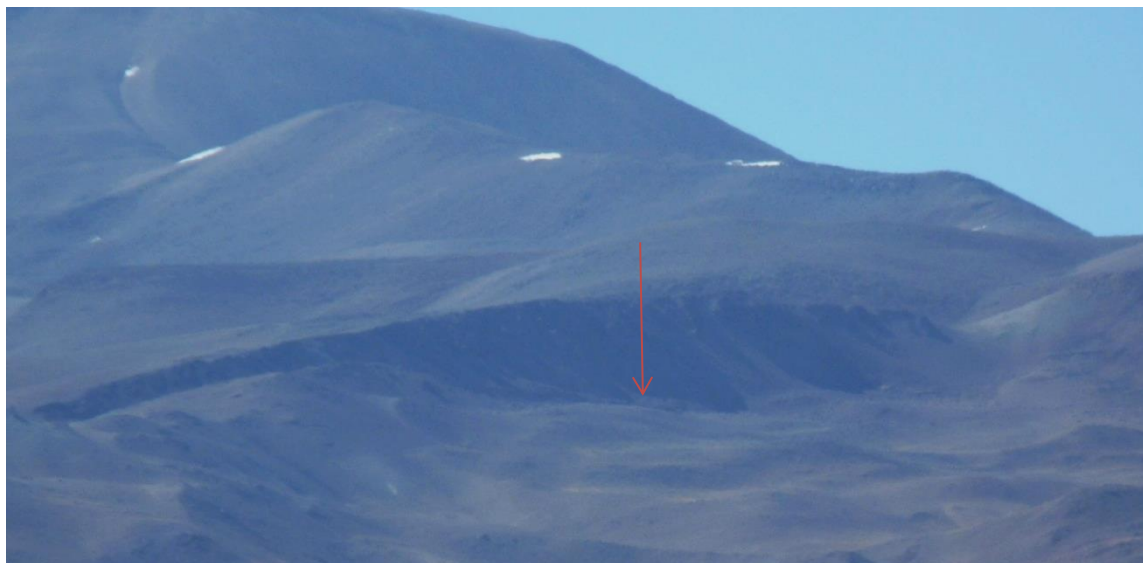


Otra vista de las geoformas obtenida desde el noroeste



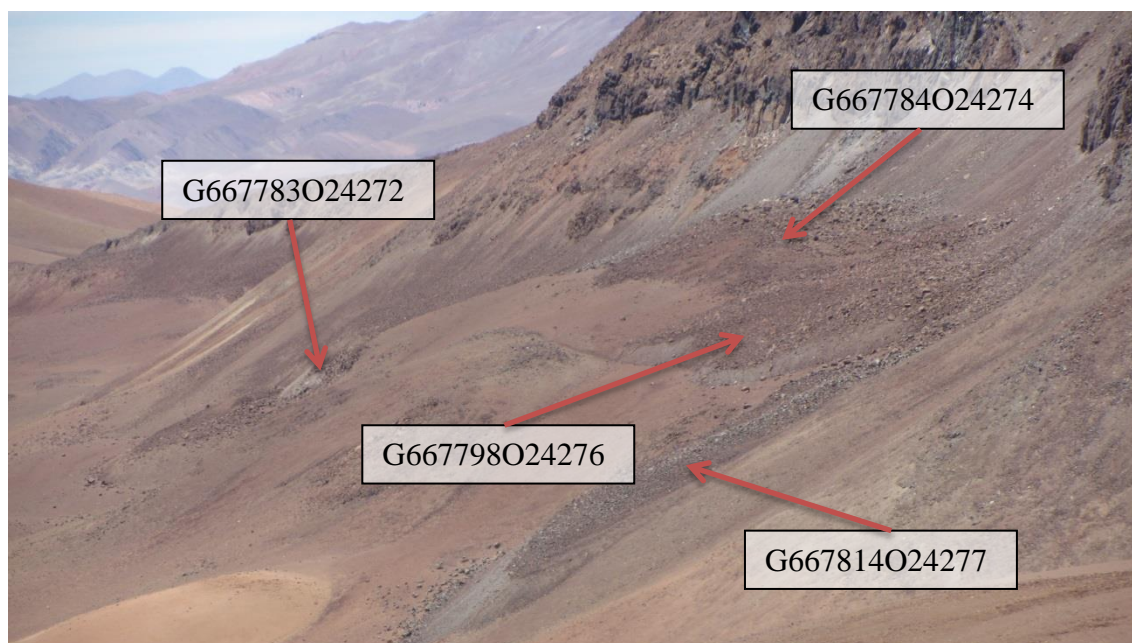
Geoforma G667708O242609S

Glaciar de escombros inactivo coalescente con orientación oeste ubicado al pie de un pronunciado talud.



Geoformas G667814O242778S, G667798O242765S, G667784O242747S, G667783O242721S

En la foto a continuación se puede observar una serie de glaciares tanto activos como inactivos. Los dos glaciares observados a la derecha de la foto, G667814O242778S y G667798O242765S, son activos en concordancia con lo que se interpretó en gabinete. En el centro se aprecia un glaciar de escombros inactivo identificado como G667784O242747S, las observaciones de campo coinciden con las del gabinete. En el sector izquierdo se observa una parte de un glaciar de escombros activo en la parte superior y que termina en una parte inactiva corresponde a la unidad que tiene el ID G667783O242721S.



Geoforma G667583O243045S

Glaciar de escombros inactivo coalescente multiráiz. Lo observado en el campo coincide con la interpretación realizada en gabinete.



7.3. Descripción de la base de datos

La base de datos del inventario se compone de 38 campos que se detallan a continuación:

1. **Provincia**
2. **Cuenca**
3. **Subcuenca**
4. **Código cuenca**

Esta columna provee información sobre la provincia, cuenca y subcuencas de cada una de las geoformas inventariadas. Se codifica de la siguiente manera:

M0550000

El primer dígito corresponde a la provincia, codificada según normativa ISO 3166 (Ejemplo: M = Mendoza, U = Chubut, K = Catamarca, F = La Rioja).

Los siguientes tres dígitos corresponden al código de la cuenca principal, el cual ha sido establecido por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SSRH). (Ejemplo 055 = Mendoza, 100 = Cuencas varias de Antártida e islas del Atlántico Sur, incluidas Islas Malvinas).

Los próximos dos dígitos corresponden a la subcuenca en la que se ha realizado el inventario. Por el momento no existe una codificación oficial establecida para esta categoría, por lo que la misma puede ser establecida por cada grupo de trabajo siempre y cuando se documente y aclare en forma inequívoca los criterios empleados y la ubicación de la subcuenca dentro de la cuenca principal.

Los dos últimos dígitos corresponden al nivel de sub-subcuenca, se empleará en aquellos inventarios que trabajen a este nivel y se procederá a codificarlos siguiendo los mismos criterios establecidos para las subcuencas.

5. **ID_local:** código único identificador de cada glaciar que consiste en las coordenadas geográficas de un punto ubicado en el interior de cada geoforma. En el ID_local, dichas coordenadas están expresadas en grados decimales de longitud y latitud con cuatro decimales. Por ejemplo, el ID_local “G699921O328801S” corresponde a un glaciar ubicado a 69.9921° de longitud Oeste y 32.8801° de latitud Sur.

6. **Tipo_geoforma:** esta columna agrupa a cada una de las geoformas inventariadas en base a su tipo principal. Los tipos de geoforma pueden ser:

GD-Glaciario descubierto: cuerpo de hielo permanente generado sobre la superficie terrestre a partir de la compactación y recristalización de la nieve y/o hielo, sin cobertura detrítica significativa, que sea visible por períodos de al menos 2 años, con evidencias de movimiento por gravedad (grietas, ojivas, morenas medias) y de un área mayor o igual a 0,01 km² (una hectárea).

MN-Manchón de nieve / glaciarete: pequeñas masas de nieve y hielo de forma indefinida. Se localizan generalmente en depresiones, lechos de ríos y pendientes protegidas. En general se desarrollan a partir de la nieve barrida por el viento, avalanchas y/o varios años de fuertes acumulaciones. En general no presentan patrones de flujo visible, y existen al menos por dos años consecutivos. Los manchones de nieve permanentes/glaciaretes son reservas significativas de agua en estado sólido y por ello han sido incluidos en este inventario.

GC-Glaciár cubierto: cuerpo de hielo permanente generado sobre la superficie terrestre a partir de la compactación y recrystalización de la nieve y/o hielo, con una cobertura detrítica significativa, que sea visible por períodos de al menos 2 años, con evidencias de movimiento por gravedad (grietas, ojivas, morenas medias) y de un área mayor o igual a 0,01 km² (una hectárea).

GE-Glaciár de escombros: cuerpo de detrito congelado y hielo, con evidencias de movimiento por acción de la gravedad y deformación plástica del permafrost, cuyo origen está relacionado con los procesos criogénicos asociados con suelo permanentemente congelado y con hielo subterráneo o con el hielo proveniente de glaciares descubiertos y cubiertos, y de un área mayor o igual que 0,01 km² (una hectárea). Los glaciares de escombros dependen fuertemente del aporte de detritos, nieve y hielo.

Los glaciares de escombros se pueden clasificar por su grado de actividad en **activos (GEA)**, **inactivos (GEI)** y **fósiles (GEF)** (Haeberli 1985; Ikeda 2004). 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. El cuerpo de sedimentos que permanece una vez que el hielo se ha derretido se llama glaciár de escombros fósil (Barsch 1978; Trombotto 2002; Brenning 2005). Esta última categoría no ha sido incluida en el inventario por no tener importancia hidrológica.

GCGE-Glaciár cubierto con glaciár de escombros: en los Andes Centrales existen numerosos casos en los que un sector de hielo cubierto por detritos se transforma gradualmente en un glaciár de escombros. En general es muy difícil identificar y determinar la posición del límite entre el hielo cubierto (ambiente glaciár) y el glaciár de escombros glaciagénico (ambiente periglaciár) en base a sensores remotos, en particular si no se cuenta con información adicional proveniente de estudios detallados de campo. Por ello, en las tareas de inventario se ha utilizado una categoría nueva denominada glaciár cubierto con glaciár de

escombros que incluye las porciones de hielo cubierto junto con el glaciar de escombros que se desarrolla a sus costados o en su porción terminal.

7. **ID_GLIMS:** es el código de identificación del glaciar que sigue las normas internacionales propiciadas por GLIMS, el nombre del glaciar está dado por las coordenadas geográficas de un punto dibujado en su interior. En este código la longitud está referida al Este.
8. **Nombre común:** si lo hubiere.
9. **Clasificación Primaria:** basada en el documento “Illustrated GLIMS Glacier Classification Manual” (Rau et al. 2005), preparado por el grupo de expertos de GLIMS http://www.glims.org/MapsAndDocs/assets/GLIMS_Glacier-Classification-Manual_V1_2005-02-10.pdf

0. Incierto

1. Sábana hielo continental: es una gran masa de hielo que cubre un continente o gran parte del mismo. En la actualidad sólo existen dos: Antártida y Groenlandia. Las sábanas de hielo no están totalmente controladas por la topografía subglaciar y se caracterizan por ser más activas en sus bordes y a lo largo de las corrientes de hielo. Las partes más altas y abombadas llamadas domos tienen escasa pendiente y flujo de hielo muy limitado.
2. Campo de hielo: masa de hielo glaciar, confinada topográficamente, de superficie relativamente plana, y de la cual fluyen glaciares de descarga, y cuya superficie es menor a 50.000 km².
3. Calota de hielo: masa de hielo glaciar no confinada, con forma de domo que fluye en todas las direcciones.
4. Glaciar de descarga: glaciar que fluye desde el interior de un campo de hielo, calota de hielo y/o sábana de hielo, transfiriendo masa hacia las zonas más bajas.
5. Glaciar de valle: glaciar con un área de acumulación bien definida, cuya lengua esta encauzada y fluye valle abajo.
6. Glaciar de montaña: un glaciar que se encuentra confinado por la topografía del terreno montañoso que lo rodea; frecuentemente localizado en un circo o nicho (Müller et al., 1977). Incluye glaciares de circo, de nicho y de cráter.
7. Manchón de nieve permanente o glaciarete: pequeña masa de nieve y hielo de forma indefinida. Se localizan generalmente en depresiones, lechos de ríos y pendientes protegidas. En general se desarrollan a partir de nieve barrida por el

viento, avalanchas y/o varios años de fuertes acumulaciones. En general no presentan patrones de flujo visibles y existen al menos por dos años consecutivos.

8. Barrera de hielo: es la porción flotante de una sábana de hielo, de considerable espesor, que fluye por gravedad sin fricción sobre el mar, y de cuyo frente se desprenden los témpanos tabulares. Se nutre de glaciares, corrientes de hielo, acumulaciones de nieve en superficie y por congelación basal. Usualmente tiene gran extensión horizontal y una superficie plana o suavemente ondulada. Las principales barreras de hielo se encuentran en la Antártida (Ross, Ronne-Filchner, Amery, entre otras).
9. Glaciar de escombros: el glaciar de escombros es una mesoforma criogénica de permafrost de montaña, sobresaturada en hielo que, si es activa, se mueve pendiente abajo por gravedad y por reptación y deformación del permafrost. Es una manifestación de un tipo de permafrost reptante. En general tiene forma de lengua o lóbulo con morfología superficial similar a la de una colada de lava. Sin embargo, sobre todo en los Andes Centrales de Argentina y Chile, los glaciares de escombros pueden alcanzar morfologías muy complejas, con zonas de aporte o de generación de cuencas compuestas y el desarrollo de más de un lóbulo frontal o una superposición de varios lóbulos.
10. Corriente de hielo: banda angosta de hielo que fluye dentro de una sábana de hielo a una velocidad muy superior al hielo circundante. Existen dos tipos principales de corrientes de hielo, confinadas y no confinadas. Las confinadas de hielo no están bien delimitadas en todas sus márgenes, que en algunas zonas son más visibles por la presencia de grietas laterales que separan las zonas de flujo muy rápido de aquellas menos activas. Las corrientes de hielo drenan la mayor parte de las sábanas de hielo, siendo las principales abastecedoras de las barreras de hielo en Antártida.

10. Forma:

0. Incierto
1. Cuencas compuestas
2. Cuenca compuesta
3. Cuenca simple
4. Circo
5. Nicho

6. Cráter
7. Colgante
8. Grupo
9. Remanente

11. Frente:

0. Normal
1. Piedemonte
2. Expandido
3. Lobulado
4. De desprendimiento
5. Coalescente no contribuyente
10. De desprendimiento y piedemonte
11. De desprendimiento y expandido
12. De desprendimiento y lobulado
13. Tributario de barrera de hielo
14. Flotante
15. De desprendimiento terrestre
16. Confluente

12. Perfil longitudinal

0. Incierto
1. Regular o uniforme
2. Colgante
3. En Cascada
4. Cascada de hielo
5. Interrumpido o reconstruido

13. Fuente de alimentación

0. Desconocida
1. Nieve-nieve volada
2. Avalancha
3. Hielo sobreimpuesto

14. Actividad de la Lengua

0. Incierto
1. Marcado retroceso

2. Leve retroceso
3. Estacionario
4. Leve avance
5. Marcado avance
6. Posible pulso (surge)
7. Pulso (surge) conocido
8. Oscilante
9. Adelgazante

15. Morena_1

0. Sin morena
1. Morena Terminal
2. Lateral y/o media
3. Morena de empuje
4. Combinación de 1 y 2
5. Combinación de 1 y 3
6. Combinación de 2 y 3
7. Combinación de 1 , 2 y 3
8. Cubierto, incierto si es morénico
9. Morenas de tipo incierto o que no figura

16. Morena_2

0. Sin morena
1. Morena Terminal
2. Lateral y/o media
3. Morena de empuje
4. Combinación de 1 y 2
5. Combinación de 1 y 3
6. Combinación de 2 y 3
7. Combinación de 1 , 2 y 3
8. Cubierto, incierto si es morénico
9. Morenas de tipo incierto o que no figura

17. Cobertura de la lengua

0. Incierto
1. Sin detrito

2. Parcialmente cubierto de detrito (10-50%)
3. Mayormente cubierto de detrito (50-90%)
4. Completamente cubierto por detrito (>90%)
5. Parcialmente cubierto de detrito con glaciar de escombros (GE) (10-50%)
6. Mayormente cubierto de detrito con GE (50-90%)
7. Completamente cubierto por detrito con GE (>90%)

18. Origen GE

0. Incierto
1. Criogénico: aquellos glaciares de escombros sin relación actual con glaciares y generados a partir de taludes y canaletas nivo-detríticas.
2. Glacigénico: aquellos glaciares de escombros originados a partir de un glaciar descubierto o cubierto.
3. Combinado 1 y 2

19. Actividad del GE

0. Incierto
1. Activo: presenta evidencias de movimiento pendiente abajo y señales del mismo en superficie. En general este tipo de glaciares tiene una topografía superficial muy irregular y desarrollan pendientes frontales muy pronunciadas (35°-45°).
2. Inactivo: no presentan movimiento pendiente abajo, pero todavía contienen hielo.

20. Forma del GE

0. Incierto
1. Lengua: largo del glaciar mayor que su ancho
2. Lobado: ancho del glaciar mayor que su largo
3. Espatulado
4. Coalescente
5. Otras

21. Estructura _I

0. Incierto
1. Unidad: formado por un único glaciar de escombros.
2. Multiunidad: formada por varios glaciares de escombros, pueden ser coalescentes o sobrepuestos.

22. Estructura II

0. Incierto

1. Una raíz: una única fuente de alimentación.
2. Multiraíz: un glaciar de escombros que se alimenta de varias fuentes de alimentación o raíces, sea cual fuere su origen.
23. **Longitud:** coordenadas geográficas de cada polígono (obtenida a partir de un centroide ubicado en el interior del mismo).
24. **Latitud:** coordenadas geográficas de cada polígono (obtenida a partir de un centroide ubicado en el interior del mismo).
25. **Área:** área de cada polígono expresada en km^2 .
26. **Largo_total:** largo de cada unidad, considerando la línea de flujo más larga de todo el glaciar, desde la zona más alta, atravesando la unidad hasta el frente de la misma, siempre lo más perpendicular posible a las curvas de nivel. Se expresa en metros (m).
27. **H_max_total:** Altura máxima total de la unidad. Se expresa en metros sobre el nivel del mar (msnm).
28. **H_med_total:** Altura media total de la unidad. Se expresa en metros sobre el nivel del mar (msnm).
29. **H_min_total:** Altura mínima total de la unidad. Se expresa en metros sobre el nivel del mar (msnm).
30. **Pendiente:** (Se expresa en grados).
31. **Orientación:** Correspondiente a los 8 puntos cardinales.
32. **H_max_parcial:** Altura máxima de los polígonos que conforman cada unidad (si los hubiere). Se expresa en metros sobre el nivel del mar (msnm).
33. **H_med_parcial:** Altura media de los polígonos que conforman cada unidad (si los hubiere). Se expresa en metros sobre el nivel del mar (msnm).
34. **H_min_parcial:** Altura mínima de los polígonos que conforman cada unidad (si los hubiere). Se expresa en metros sobre el nivel del mar (msnm).
35. **Img_ba_F:** Fecha de la imagen de base a partir de la cual se realizó el inventario.
36. **Img_ba_S:** tipo de sensor que capta la imagen empleada para el inventario (AVNIR, PRISM, CBERS, etc.).
37. **Img_ap_F:** Fecha de la imagen de apoyo utilizada.
38. **Img_ap_S:** tipo de sensor que capta la imagen de apoyo empleada.



Ministerio de Ambiente
y Desarrollo Sustentable
Presidencia de la Nación

IANIGLA



CONICET

U. N. CUYO
GOBIERNO
DE MENDOZA

El 28 de Octubre de 2010 fue promulgada la Ley 26.639 de “Presupuestos Mínimos para la Preservación de los Glaciares y del Ambiente Periglacial”. Esta ley contempla, entre otras medidas, la creación de un Inventario Nacional de Glaciares. Este inventario es fundamental para un estudio de largo plazo de los cuerpos de hielo de Argentina, su dinámica, hidrología y relación con el ambiente, definiendo metodologías de mapeo y monitoreo sistemáticos aplicables a las diferentes regiones y condiciones ambientales de nuestro país.

A partir del trabajo realizado por el Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA), con la coordinación del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, se han inventariado 16.078 glaciares y geoformas periglaciares en la cordillera de Los Andes y 890 en las Islas del Atlántico Sur, los cuales ocupan una superficie de 5.769 y 2.715 km² respectivamente. El Inventario Nacional de Glaciares describe por primera vez, en un instrumento sistematizado, todos los glaciares y geoformas periglaciares que actúan como reservas hídricas existentes en el territorio nacional, con toda la información necesaria para su adecuada protección, control y monitoreo.

El presente informe describe los resultados del Inventario Nacional de Glaciares de la subcuenca Salar de Cauchari, Cuencas Varias de la Puna, provincias de Salta y Jujuy.





República Argentina - Poder Ejecutivo Nacional
2018 - Año del Centenario de la Reforma Universitaria

Hoja Adicional de Firmas
Informe gráfico

Número:

Referencia: ING Salar de Cauchari

El documento fue importado por el sistema GEDO con un total de 46 pagina/s.