

EL PERMAFROST REPTANTE, INVENTARIO Y VERIFICACIÓN EN LAS CABECERAS DEL RÍO BERMEJO

PERMAFROST CREEPING, INVENTORY AND VERIFICATION IN THE UPPER BASIN OF BERMEJO RIVER

Ana Lía Ahumada^{1,2}, Gloria P. Ibáñez Palacios¹, Mario A. Toledo¹, Julieta Carilla² y Silvia V. Páez¹

¹Fundación Miguel Lillo. Miguel Lillo 251. San Miguel de Tucumán. Argentina.

²CONICET. Argentina.

E-mail: anaa.gavri@gmail.com

RESUMEN

Los glaciares de escombros son reservorios de agua dulce congelados en las altas montañas del mundo y son claves para la vida de la población local y sus economías. La presencia de glaciares de escombros es usada comúnmente como indicador directo de condiciones de permafrost de montaña.

En las cabeceras de la alta cuenca del río Bermejo se han localizado glaciares de escombros, mediante técnicas de interpretación visual en distintos tipos de imágenes satelitales e identificación en terreno de las geoformas. Esta región de los Andes Áridos es particularmente vulnerable al calentamiento global: por la fragilidad de los ecosistemas y por la alta vulnerabilidad de la población.

Este estudio tiene por objeto proveer observaciones preliminares de la distribución de los glaciares de escombros y de las geoformas periglaciales asociadas a nivel regional. Además, es un aporte al conocimiento de la hidrología de la región ya que se ha generado información de base para la adaptación a los procesos de cambio que sobrevendrán.

Los resultados, también ponen en evidencia las ventajas de usar técnicas geomáticas en áreas de accesibilidad dificultosa, con reducción de costos y tiempo de trabajo.

Palabras Claves: permafrost de montaña, glaciares de escombros, alta cuenca del río Bermejo, Geomática.

ABSTRACT

Rock glaciers are frozen water reservoirs in the mountain areas of the world. Water resources are important for the local habitants and economies. The presence of rock glaciers is commonly used as a direct indicator of mountain permafrost conditions.

In the headwaters of the upper basin of Bermejo river rock glaciers have been located using visual interpretation techniques in different types of satellite imagery and field identification.

Ecosystems and their population in the Dry Andes are particularly fragile to any change caused by global warming.

This study aims to provide preliminary observations of rock glaciers and associated periglacial geoforms. This is a contribution to the knowledge of the hydrology of the region to generate baseline information for adapting to possible future changes. Results put in evidence the advantages of using geomatics tools in areas of difficult accessibility, with reduced costs and work time.

Key words: mountain permafrost, rock glaciers, upper basin of the Bermejo river, Geomatics.

INTRODUCCIÓN

El río Bermejo tiene sus nacientes en Bolivia (Tarija) y en el NO Argentino, en el límite de las provincias de Salta y Jujuy, en los Andes Áridos, en Cordillera Oriental, sierra de Santa Victoria por lo que es un cauce de incumbencia internacional, con importantes recursos naturales y económicos en sus zonas de influencia (COBINABE, 1995). En la alta cuenca del río Bermejo (entre los 3600 m s.n.m.

y más de 5000 m s.n.m.), se han localizado glaciares de escombros en 3 de las subcuencas de altura que la constituyen: la del río Condado, la del río Iruya y la del río Los Toldos–Lipeo.

Los glaciares de escombros son geofomas criogénicas meso-escalares de alta montaña constituidos por una mezcla de hielo y materiales no consolidados moviéndose pendiente abajo. Tienen un contenido de hielo menor que los glaciares descubiertos, estimado entre el 40 y 60% y una capa activa de un espesor variable en función de la altura (Barsch, 1996; Trombotto y Ahumada, 2005; Trombotto y Borzotta, 2009), con marcadas diferencias geomorfológicas. Generalmente, presentan forma de lóbulo o lengua y en algunos casos, sistemas complejos superpuestos polimórficos, originados por el aporte o ingreso de rocas provenientes de taludes o incorporadas del detrito morénico. En la superficie muestran algún grado de selección, arrugas y surcos, productos de la deformación de la mezcla de hielo y detrito que son indicadores de mecanismos de flujo.

Haerberli (1985) y Trombotto (1991), entre otros, los caracterizan como la mayor expresión geomorfológica del permafrost reptante. El permafrost es definido como suelo que permanece con temperaturas por/o debajo de 0°C por dos o más años consecutivos (van Everdingen, 1998). La presencia de glaciares de escombros es usada comúnmente como indicador directo de condiciones de permafrost de montaña. Para los Andes Centrales, Trombotto et al. (1999) indican que es posible localizar permafrost de montaña próximo a la altura de la isoterma media anual de 0°C, o incluso en emplazamientos con temperaturas positivas en función del balance de energía superficial. Brenning (2005) a su vez, determina valores de 0.5°C para el nivel de 3500 m s.n.m. con la mayor concentración de glaciares de escombros de los Andes Centrales chilenos; además, reconoce la ocurrencia de glaciares de escombros intactos (activos e inactivos: ambas categorías contienen hielo, Barsch 1996) a una altura de 3000 m s.n.m., donde se encuentra la isoterma de 4°C.

Los glaciares de escombros son particularmente frecuentes y bien desarrollados en regiones montañosas continentales áridas a semi-áridas poseedoras de una importante producción de material detrítico y constituyen un reservorio o almacén de recursos hídricos congelados que contribuyen al régimen hidrológico en las altas montañas del mundo (Corte, 1976, 1978; Gorbunov, 1978; Burger et al. 1999; Trombotto, 2000; Brenning, 2005, entre otros autores). Su condición de acuífero potencial es demostrada por los arroyos que fluyen desde sus frentes. Son las geofomas de permafrost más visibles y representables por mapeo.

El reconocimiento de permafrost es de importancia crucial ante las transformaciones generadas por el cambio climático, ya que se trata de un fenómeno térmico que reacciona sensiblemente a las modificaciones de la temperatura media anual del aire. Su distribución en la alta montaña de la región intratropical de Argentina es aún poco conocida. El calentamiento global ha incidido marcadamente en las regiones glaciales y periglaciales de alta montaña del mundo, con tasas aceleradas de cambio (Haerberli y Beniston, 1998). Mientras los glaciares descubiertos retroceden y se predice su descongelamiento durante el siglo XXI, el agua contenida en el hielo de los glaciares de escombros está protegida de los cambios térmicos por su capa rocosa aislante (capa activa), que les permite permanecer congelados más tiempo, no obstante estar en desequilibrio con el régimen térmico actual y con los rápidos cambios del clima en el presente (Brenning, 2005).

Con el incremento de la población mundial, la provisión de agua dulce constituye un problema global que se manifiesta con una demanda creciente y un suministro decreciente, agravado por el efecto del calentamiento global sobre las reservas congeladas.

En la Cordillera de los Andes las temperaturas se han incrementado en 0.62°C entre 1901 y 1997, superando en 0.4°C lo esperado durante los 90 (IPCC, 2001). Recientemente se informó que el cambio de temperatura global de la superficie terrestre para el final del siglo XXI es probable que exceda 1.5°C con respecto a los calculados previamente para 1950/2000 en la mayoría de los escenarios planteados por el IPCC (IPCC, 2013). Estos fenómenos, generarán grandes cambios en las comunidades de montaña afectando sus economías de subsistencia y alimentarias. Por ello la identificación de estos recursos hídricos congelados ha tomado una trascendencia significativa en nuestro país (IANIGLA, 2010).

Este estudio tiene por objeto realizar, en esta primera etapa, un inventario sobre la distribución, localización y morfometría de los glaciares de escombros activos e inactivos (reservas hídricas congeladas) y de geofomas que acompañan a los mismos en la alta cuenca del Río Bermejo, poniendo énfasis en su reconocimiento mediante el uso de imágenes satelitales, Modelo Digital de Elevación (MDE) y Sistema de Información Geográfica (SIG). El inventario realizado a partir de los métodos indirectos de detección, fue corroborado mediante el control de campo.

Los resultados alcanzados permitirán además, contribuir a la obtención de una línea de base ambiental necesaria para la planificación territorial en los organismos gubernamentales de manejo de recursos hídricos, desarrollo sustentable y prevención de riesgos, vulnerabilidad y adaptación de la población.

CLASIFICACIÓN DE LOS GLACIARES DE ESCOMBROS

En función de su estado termodinámico y su contenido de hielo, se pueden reconocer tres tipos de glaciares de escombros (Wahrhaftig y Cox, 1959; Barsch, 1996; entre otros):

- *Glaciares de escombros activos*: sus frentes carecen de vegetación, tienen una inclinación pronunciada, que supera el ángulo de reposo de los materiales, más de 32° y manifiestan en su superficie una deformación significativa (crestas y surcos transversales) e inestabilidad en su cobertura rocosa, características morfológicas diagnósticas de movimiento producto de su contenido de hielo. En el terreno los glaciares de escombros activos muestran superficies latero-frontales frescas (las rocas se encuentran casi sin alteración o pátinas), bordes agudos y caídas de bloques en el frente, indicadoras de movimiento.

- *Glaciares de escombros inactivos*: sus frentes tienen pendientes menos elevadas y han sido invadidos por vegetación parcialmente, tienen sus bordes suavizados o redondeados, no presentan movimiento y aún contienen hielo. Evidencian pendientes frontales y marginales oscuras con poco contraste de color.

- *Glaciares de escombros relícticos o fósiles*: han perdido su contenido de hielo y carecen de movimiento. Han sido cubiertos por vegetación totalmente y tienen una topografía muy irregular producto de la desaparición del hielo.

ÁREA DE ESTUDIO

La sierra de Santa Victoria constituye el límite interprovincial entre Jujuy y Salta y la cadena montañosa más septentrional de la provincia geológica de la Cordillera Oriental. La sierra de Santa Victoria se extiende entre los 22°08' S y los 23°00' S (Trópico de Capricornio) y entre 65° y 65°30' O (Figura 1). Su altura máxima es de 5055 m snm y su altura media de 3000 m s.n.m. Sus laderas orientales, en territorio salteño, contienen las cabeceras del río Bermejo Superior con una topografía muy accidentada e inaccesible.

Conforma un cordón longitudinal angosto orientado en dirección norte-sur en su tramo septentrional y en su parte austral posee una variación en su dirección pasando a ser nornordeste-sudsudoeste como consecuencia de sucesivos desplazamientos estructurales hacia el oeste. Con alturas superiores a 5000 m s.n.m., sus alturas máximas son el Cerro Azul Casa (5009 m s.n.m.), el C° Fundación (5050 m s.n.m.), C° Negro (5029 m s.n.m.) y el C° Campanario (4730 m s.n.m.). El área de estudio se localiza en su ladera oriental, desde los 3800-4000 m s.n.m. hasta los 5000 m s.n.m. o más, donde se desarrolla la red de avenamiento que constituyen las cuencas de cabecera del río Bermejo superior.

En su conformación geológica se destacan afloramientos del basamento representados por la Formación Puncoviscana (de edad precámbrica–eocámbrica), el Grupo Mesón (areniscas cámblicas), depósitos de lutitas y areniscas del Grupo Santa Victoria, (de edad ordovícica) a las que se superponen acumulaciones clásticas del Pleistoceno superior y Holoceno.

El estilo estructural marcado por la tectónica Neógena, en la Cordillera Oriental es de fallamiento y plegamiento, representando una comarca elevada que se desplaza hacia el este sobre Sierras Subandinas.

Los rasgos geomorfológicos más destacados corresponden a la actividad glaciaria y periglacial. En el pasado acontecieron ocho eventos glaciarios evidenciados por sus depósitos morénicos y tres ciclos de generación de glaciares de escombros que fueron datados en base a determinaciones de C¹⁴ en muestras de turba y en horizontes fósiles A y Ck. (Zipprich et al., 2000). Las morenas más antiguas que se preservaron por su mayor desarrollo y extensión, son anteriores al último máximo glacial (M1 a M3). Los glaciares de escombros RG1 (relícticos o fósiles actualmente) serían productos de eventos periglaciales posteriores al depósito de M3; las morenas M4 y M5 corresponden al Tardiglacial. La depositación de las morenas M6 aconteció durante el Holoceno temprano. La sedimentación de las morenas M7 ha sido datada con una edad máxima de 5280±200 C¹⁴ años A.P. Los glaciares de escombros inactivos RG2 estuvieron activos en este ciclo. Cambios en las condiciones climáticas facilitaron posteriormente la acumulación de las morenas M8.

Las condiciones actuales del clima se establecen alrededor del 1500 C¹⁴ años A.P., con actividad de glaciares de escombros (RG3) en los circos. En el presente no existen cuerpos de hielo descubierto debido a las características semi-áridas del clima actual. Su existencia pasada fue relacionada a modificaciones climáticas que implicaron mayores precipitaciones, producto de aumento en el flujo de humedad del NE, que se interpretó como una intensificación o traslación al Sur del sistema tropical de circulación atmosférica (Zipprich et al., 2000; Schäbitz et al. 2001).

En cuanto al clima actual de la región, durante la estación estival, los vientos alisios procedentes del Atlántico, descargan su humedad en las Sierras Subandinas y la Cordillera Oriental de la provincia de Salta con los mayores niveles de precipitación, unos 1200 mm en promedio, en alturas inferiores a los 3000 m s.n.m. correspondientes a la cuenca baja. Estos vientos al ascender a la región de trabajo, llegan poco cargados de humedad, con alrededor de 390 mm (Kull et al., 2003). En contraste, el invierno es la estación seca debido a la instauración del anticiclón del Atlántico Sur en la región chaco-salteña, como consecuencia de las bajas temperaturas reinantes. En la zona de trabajo, los vientos son considerablemente fuertes.

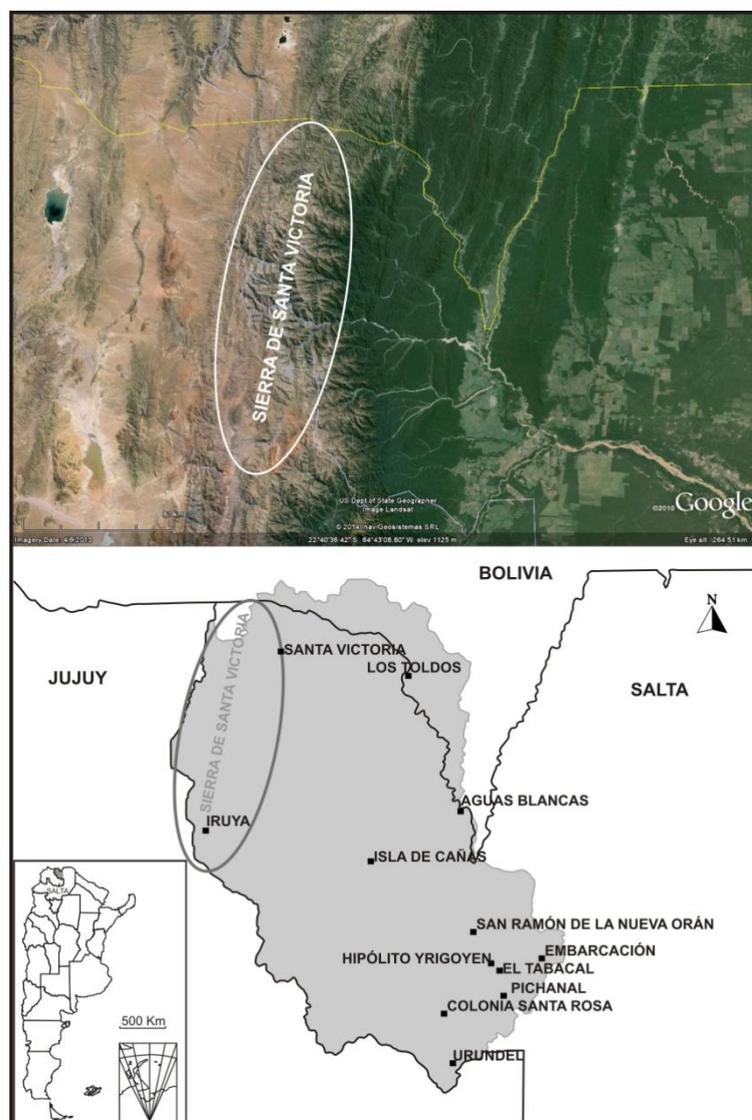


Figura 1. Ubicación geográfica de: a). La sierra de Santa Victoria (óvalo blanco), b). Cuenca del Rio Bermejo, y c) en mapa de Argentina.

Figure 1. Geographic location of: a). Sierra de Santa Victoria (white oval), b). Bermejo river Basin, and c) in Argentinean map.

La Estación Meteorológica La Quiaca S.M.N. (3459 m s.n.m.) ubicada a la sombra de la Sierra de Santa Victoria, recibe solo 322 mm/año de precipitación y registra una temperatura media anual del aire de 9.4°C (promedio periodo 1908–1990, Bianchi y Yañez 1992). La Quiaca, registra poca variación climática estacional pero con una amplitud térmica diaria muy marcada. Los días son cálidos con temperaturas máxima media anual de 19 a 20°C y las noches son frías con temperaturas mínima media anual de 0 a -2°C (Minetti, 2005). Teniendo en cuenta el gradiente altitudinal de 0.8°C/100 m (ajustado por Kull et al., 2003) y en base a los datos de la estación meteorológica La Quiaca, calculamos por extrapolación, la temperatura media anual del aire para una altura promedio

de 4400 m s.n.m., que resultó de unos 1.9°C aproximadamente y para los 4600 m s.n.m. de 0.3°C aproximadamente.

Estas condiciones meteorológicas generan fenómenos de congelamiento y descongelamiento diario y estacional. Estos procesos favorecen la conformación de paisajes periglaciales e imponen severas limitaciones al desarrollo de la vida vegetal, y por ende a los cultivos. La orografía juega un rol primordial en el clima para esta región de altura. A su vez, el clima y la exposición de las laderas, son decisivos en las características morfocriogénicas del sector (Masaguer, 2009).

La radiación solar que incide en la región es elevada, al igual que en todas las regiones andinas de altura, sumada a sublimación durante el invierno y evaporación, fundamentalmente en el verano. Minetti (2005) calcula una radiación global para la región de 140 Kcal/cm². Esta radiación influye de manera considerable en las geoformas y procesos criogénicos que allí se generan, al igual que en las características de los sistemas hídricos (Schrott, 1994).

La región pertenece al dominio fitogeográfico andino- patagónico representado por las provincias Puneña y Altoandina. La provincia Altoandina, entre 4000 a 4800 m s.n.m., contiene pastizales altoandinos puros, con arbustos y vegas de altura como unidades azonales, entre pedregales y roquedales. (Ruthsatz y Movia, 1975).

Los habitantes de estas regiones se agrupan en pequeños pueblos o caseríos (rodeos) y en puestos dispersos por los cerros en sitios escabrosos y alejados. La ganadería y la agricultura representan la actividad productiva de la región, tratándose de una economía de subsistencia. Toda la zona posee una tradición antigua con valiosas expresiones culturales mestizas e indígenas de los grupos denominado *collas*. Su condición de habitabilidad hace que los indicadores sociales muestren valores de desventajas para este grupo socio-cultural que por otro lado cumple un rol fundamental en la ocupación y utilización del territorio.

METODOLOGÍA

Para la realización del inventario se siguió la metodología estandarizada por el grupo del IANIGLA (Castro, et al., 2012). En la región de trabajo no existen glaciares descubiertos ni manchones de nieve, solo existen glaciares de escombros. Los mismos sólo pueden ser mapeados por digitalización manual (Stokes et al., 2007), utilizando software de código abierto o libre.

Delimitación de cuencas hidrográficas a partir de modelos de elevación

La delimitación de cuencas hidrográficas se efectuó con el objetivo de extraer la red de drenaje y sus respectivas cuencas para poder separar las áreas clasificadas como glaciares de escombros en cuerpos independientes. Este es un paso fundamental para la realización de un inventario de glaciares en montañas (Castro et al. 2012). Se utilizó el software Quantum GIS-GRASS (<http://qgis.org/>) para el procesamiento del Modelo Digital de Elevación GDEM2, con una resolución espacial de 30 m (<http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/>).

Las herramientas de GRASS están ordenadas en una serie de pasos sucesivos a seguir, a través de instrucciones y reglas bien definidas, determinadas en una lista de Módulos. El procedimiento comienza con el Módulo “r. fill. dir”, con el cual se realizó el pre-procesamiento del GDEM2, este paso es necesario para asignarle valores altimétricos a todos los sumideros que no los poseen y que pueden generar errores en la capa de salida, con este procedimiento se obtuvo un GDEM2 con todos los sumideros llenos. Posteriormente se utilizó el Módulo “r. watershed” sobre el GDEM2 creado en el paso anterior, el tamaño mínimo de cuenca elegido fue de 100 km². Finalizado el proceso se obtuvieron mapas de cuencas, de segmentos de corriente y de dirección de drenaje. Con el módulo “r.to.vect.area” se procedió a vectorizar los mapas obtenidos y con el Módulo “v.out.ogr” fueron convertidos al formato shape (.shp). La capa de cuencas fue corregida luego por digitalización manual con el software libre KOSMO (<http://www.openSIG.es/>), dado que no siempre hay coincidencia entre el límite de una cuenca obtenida de un MDE y el límite de la misma cuenca en una imagen satelital, cuando se superponen ambas capas y se realiza una observación directa.

Selección de imágenes satelitales y georreferenciación

Para realizar el inventario de glaciares de la cuenca río Bermejo se usaron las imágenes Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) del satélite TERRA (obtenidas por el convenio IANIGLA-GLIMS), China Brazil Earth Resource Satellite (CBERS) 2B (sensor High Resolution Panchromatic Camera –HRC-) LANDSAT Thematic Mapper (TM) y Google Earth como herramienta complementaria, útil dada la alta resolución espacial de sus imágenes, y la posibilidad de

observar con distintos ángulos e inclinaciones los rasgos superficiales de las geoformas a inventariar, basados en la experiencia de Bajracharya y Shrestha (2011), en el inventario de glaciares del Himalaya.

Las imágenes LANDSAT 5 TM, fueron provistas del sitio USGS (United States Geological Survey), aceptadas con base de referencia (Tucker et al., 2004). La selección de las imágenes utilizadas se muestra en la Tabla 1.

ID imagen	Fecha	Nivel de procesamiento	Objetivo
<i>Landsat TM:</i> LT52310762009221COA01	09/08/2009	Georeferenciada y ortorectificada en origen	Base georeferenciación
<i>Landsat TM:</i> LT52310752009221COA01	09/08/2009	Georeferenciada y ortorectificada en origen	Base georeferenciación
<i>ASTER:</i> AST14OTH_003_0507200114 4530_20120705080807_3852	07/05/2001	Georreferenciada referencia (LANDSAT5 TM)	Apoyo delimitación de glaciares de escombros
<i>ASTER:</i> AST14OTH_003_0713201114 4134_20120705080807_3849	13/07/2001	Georreferenciada referencia (LANDSAT5 TM)	Apoyo delimitación de glaciares de escombros
<i>CBERS_2B_HRC_2009083</i> 0_173_B_126_1_L2_BAND1	30/08/2009	Georreferenciada referencia (LANDSAT5 TM)	Apoyo delimitación de glaciares de escombros
<i>CBERS_2B_HRC_2009083</i> 0_173_B_126_2_L2_BAND1	30/08/2009	Georreferenciada referencia (LANDSAT5 TM)	Apoyo delimitación de glaciares de escombros
<i>CBERS_2B_HRC_2009082</i> 2_173_A_125_2_L2_BAND1	22/08/2009	Georreferenciada referencia (LANDSAT5 TM)	Apoyo delimitación de glaciares de escombros
<i>CBERS_2B_HRC_2009082</i> 2_173_A_125_3_L2_BAND1	22/08/2009	Georreferenciada referencia (LANDSAT5 TM)	Apoyo delimitación de glaciares de escombros
<i>CBERS_2B_HRC_2009082</i> 2_173_A_125_4_L2_BAND1	22/08/2009	Georreferenciada referencia (LANDSAT5 TM)	Apoyo delimitación de glaciares de escombros

Tabla 1. Imágenes Satelitales seleccionadas para el inventario de glaciares de escombros en la alta cuenca del río Bermejo.

Table 1. Selected Satellite Images to the inventory of rock glaciers in the High Bermejo river basin.

Para minimizar posibles errores que introduce la cobertura nubosa en la digitalización de las geoformas, se eligieron imágenes de la época del año con menores precipitaciones, abril a octubre, dado que en las montañas del NOA el 80% de las precipitaciones están concentradas durante los meses estivales, diciembre a febrero, con menos frecuencia en los invernales, junio a agosto (Minetti, 2005).

Las imágenes LANDSAT TM se utilizaron como base de georreferenciación y se realizó con el software libre gvSIG. Las imágenes ASTER y CBERS 2B, de 15 y 2.7 m de resolución geométrica respectivamente, fueron utilizadas para la identificación visual, digitalización y mapeo de los glaciares de escombros y cubiertos. Las coordenadas fueron referidas al sistema de referencia global WGS84 y proyectadas en el sistema Universal Transverse Mercator (UTM), zona 19S. Este sistema de referencia y proyección es utilizado internacionalmente, lo que permitirá comparar los resultados obtenidos en este trabajo con la información de otros países. Las superficies están expresadas en km² y las alturas en metros sobre nivel del mar (s.n.m.). El GDEM2 (ASTGTM2_S27W067), se usó para delimitar las cuencas y para calcular las curvas de nivel (cada 500 m).

Digitalización de los glaciares de escombros

La base de datos del inventario de glaciares y ambiente periglacial de la cuenca del río Bermejo incluye la identificación de cada uno de los glaciares, su clasificación morfológica, y parámetros de índole física tales como área, altura máxima, media, mínima, orientación, pendiente, largo total, etc. Estas bases de datos fueron armadas mediante el software KOSMO.

Para clasificar los glaciares se usaron las normativas internacionales en uso (principalmente del WGMS, 2008, Racoviteanu et al 2009 y GLIMS, <http://www.glims.org/>), con adaptaciones debido a las particularidades de las geformas de los Andes del NOA. Se identificaron glaciares de escombros activos e inactivos y se incluyeron geformas con áreas mayores a 0.01 km².

Cabe destacar, que en algunos casos las geformas periglaciales que detectamos pueden estar compuestas por secciones de glaciares de escombros activos e inactivos formando parte de una sola unidad glaciaria con un código de identificación único (ID). El código de identificación o ID de un glaciar fue generado a partir de las coordenadas geográficas de un punto ubicado en el interior del mismo expresadas en longitud y latitud. Por ejemplo, el glaciar identificado con el ID igual a G662233O261641S corresponde al glaciar que contiene un punto situado 66.2233° O y 26.1641° S.

Control de inventario en terreno

Los resultados obtenidos según la metodología descrita, fueron validados en campañas llevadas a cabo en sectores accesibles de la cuenca, en las cuales se realizó el reconocimiento y examen de los glaciares de escombros, con el fin de comprobar su localización, estado actual y clasificación primaria.

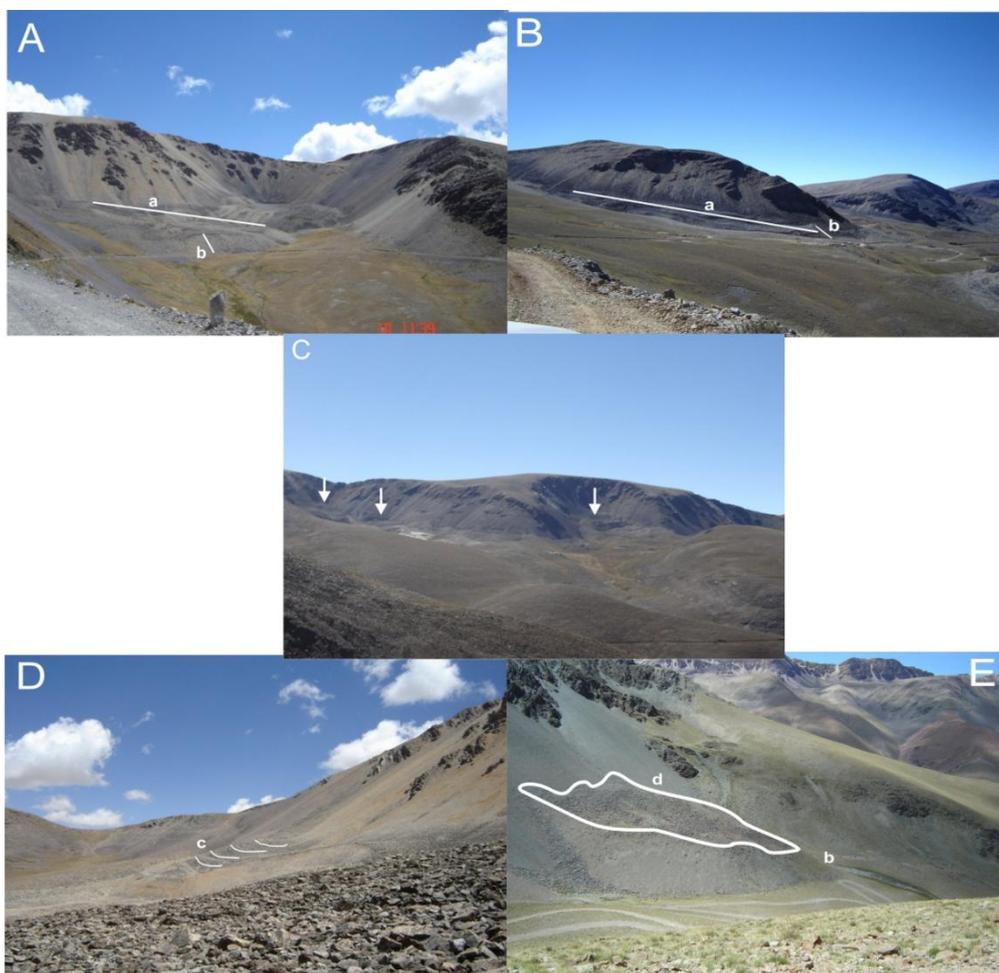


Figura 2. Glaciares de escombros: A). glaciar complejo con desarrollo de vegas, B). Glaciar multiraíz, C). Glaciares complejos, circos glaciarios, morenas, D). glaciar de talud, e-glaciar de escombros de talud con vega. a). longitud del glaciar de escombros. b). espesor del frente del glaciar. c). crestas, indicadoras de movimiento. d). perímetro de la superficie superior del glaciar.

Figure 2. Rock glaciers: A). Complex rock glaciers with bog, B). Multiroot rock glacier, C). Complex rock glaciers, glacial cirques, moraines; D). talus rock glacier, E-talus rock glaciers with bog. a). Rock glacier length. b). Thickness of the rock glacier front. c). Ridges, indicative of movement. d) Perimeter of the top surface of rock glacier.

Para ello, se realizaron mediciones de pendiente de los frentes mediante inclinómetro marca Suunto. La posición geográfica de la superficie superior de las geoformas fue medida con navegador GPS marca Garmin-Etrex VISTA (error de lectura en la horizontal <10 m, en vertical puede ser mayor). Las mediciones de longitudes, aproximadas, fueron realizadas con cinta métrica metálica de 50m, jalones y nivel de mano, mediante el procedimiento rápido de uso tradicional y se realizaron estimaciones porcentuales de superficie cubierta por vegetación en los frentes. Se constató la caída de rocas en el frente o la acumulación de bloques en la base de la nariz de las geoformas (Figura 2).

Asimismo se realizaron observaciones in-situ de procesos periglaciales activos de congelamiento estacional, los que pueden observarse en la Figura 3 y del comportamiento de geoformas asociadas a los glaciares de escombros, lagunas y vegas.



Figura 3. Procesos periglaciales: A). hielo lenticular en el suelo; B). hielo lenticular en el suelo; C). perfil de suelo descongelado; D). estructura sacarosa; E). suelo estructurado, F). extrusión.

Figure 3. Periglacial processes: A). lenticular ice in soil; B). lenticular ice in soil; C). thawed soil profile, D). saccharose structure; E). structured soil; F). extrusion.

Medición del caudal utilizando molinete hidráulico y cinta métrica

Se identificaron los canales de desagüe de los glaciares de escombros y se definieron los sitios de medición. Estos sitios deben tener las siguientes características:

- El canal donde se realiza la medición debe ser recto.
- La sección transversal y la pendiente deben ser uniformes.
- La profundidad debe ser suficiente para que el molinete quede inmerso en el agua.
- El canal debe estar limpio y libre de obstrucciones.

Para medir la velocidad de la corriente se utilizó un molinete hidráulico marca Seedmech- Global Water, modelo: FP111. La velocidad media se determinó al 60% de la profundidad del flujo, con 5 lecturas en cada punto, el error aproximado de este método es del 3%. El tiempo de medición de cada lectura se consideró entre 30 a 60 segundos, según la velocidad de la corriente.

Se procedió luego a calcular el área de la sección hidráulica transversal del canal, que por tratarse de cauces naturales presentan forma irregular. Para ello se midió meticulosamente, utilizando una cinta métrica, el ancho del canal y las profundidades en sentido transversal al flujo de la corriente, en tramos fijos cada 5 cm. La forma irregular del área transversal obtenida fue dividida en formas regulares para el cálculo de las áreas parciales. La sumatoria de las mismas dio como resultado las áreas de las secciones hidráulicas transversales en los puntos de medición.

Con la aplicación de la fórmula: Q (caudal) = V (velocidad) \times A (área), se obtuvieron los caudales correspondientes a cada sitio de muestreo.

Estos caudales fueron tomados en las proximidades de sistemas periglaciales complejos con glaciares de escombros de los que pequeños arroyos. En algunos casos se descendió hasta 600 m debajo del frente de las geoformas, para realizar la medición en la confluencia de la mayor cantidad de corrientes vinculadas al sistema medido. Las temperaturas fueron tomadas con un termómetro digital modelo CTH 6200 con sonda.

Se realizaron controles de terreno en cada sub-cuenca. Las campañas a la región se efectuaron en los meses de mayo y setiembre (el 1º año) y en abril y diciembre (el 2º año). Fueron 4 campañas de 5 días cada una.

RESULTADOS

La cuenca del Río Bermejo ocupa una superficie de 14535.8 km². En tres de sus subcuencas: ríos Iruya, Condado y Los Toldos–Lipeo, se encuentran geoformas periglaciales, que fueron inventariadas y cubren una superficie de 9.12 km². En total se inventariaron 253 geoformas (más 33 geoformas < 0.01 km², protalus, que suman 0.1 km²). De las 253 geoformas inventariadas, 13 unidades están formadas por más de 1 polígono, correspondientes a un glaciar de escombros activo asociado con otro inactivo, cuyos límites están poco definidos, formando en total 238 unidades mapeadas (Figura 5).

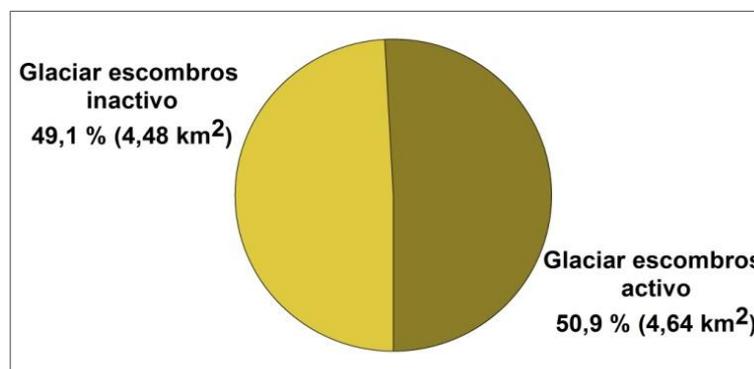


Figura 4. Distribución porcentual según actividad de las geoformas inventariadas en la alta cuenca del río Bermejo.

Figure 4. Percentage distribution according to activity landforms inventoried in the high Bermejo river basin.

Se han determinado desde el punto de vista de su geometría, glaciares de escombros en forma de lengua, lobulados o equidimensionales simples o complejos. En el caso de los sistemas de glaciares de escombros complejos encontramos del tipo multiraíz, multiunidad y multilobulados. Los dos últimos tipos han sido adjudicados a sucesivas reactivaciones (Haeberli, 1985; Trombotto y Borzotta, 2009) pudiendo identificar hasta tres ciclos (Figura 2).

Los glaciares de escombros de talud, son los más frecuentes y estos a su vez, se presentan asociados generando otro tipo de formas complejas. El mayor número de glaciares de escombros de talud en la región está relacionado con valores de pendiente superiores a 20°. Los mismos generalmente se desarrollan en las paredes de los antiguos circos glaciares contando con una fuerte provisión de detrito desde los taludes o de las paredes. Los glaciares de escombros también suelen ocupar el fondo de valle glaciar, desarrollando en estas situaciones formas espatuladas y/o lobuladas.

De las 238 unidades inventariadas, 97 (4.64 km²) se identificaron como glaciares de escombros activos y 141 (4.48 km²) como glaciares de escombros inactivos (Figura 4).

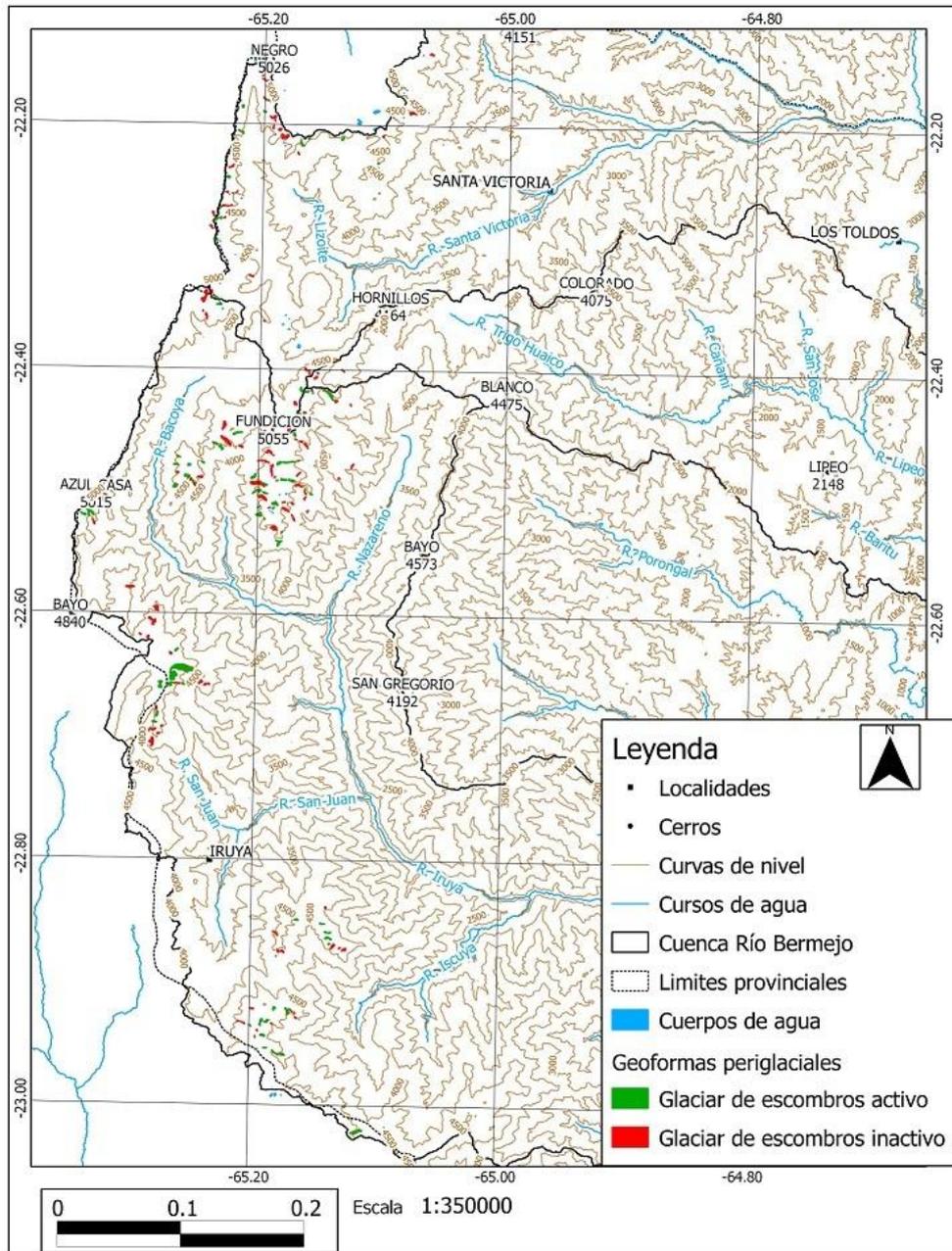


Figura 5. Mapa de localización y distribución de glaciares de escombros en las subcuencas río Condado, río Toldos-Lipeo y río Iruya.

Figure 5. Location and distribution map of rock glaciers in Condado river, Los Toldos-Lipeo river and Iruya river sub basins.

El estado de actividad de los glaciares de escombros ha sido validado en terreno en función de sus atributos geomorfológicos. En este sentido las condiciones de actividad de estas geformas en la región, hasta tanto se realicen estudios de determinación de estructura interna y de movimiento, tendrían características transicionales entre los tres tipos de actividad conocidos. Se han observado sistemas complejos de glaciares de escombros con sectores activos, inactivos y relícticos.

La orientación predominante de las geformas inventariadas es S (29%, n=62), SO (27%, n=64), SE (26%, n=62) y en menor medida O (11%, n=25), (Figura 6) indicando dependencia con la radiación solar.

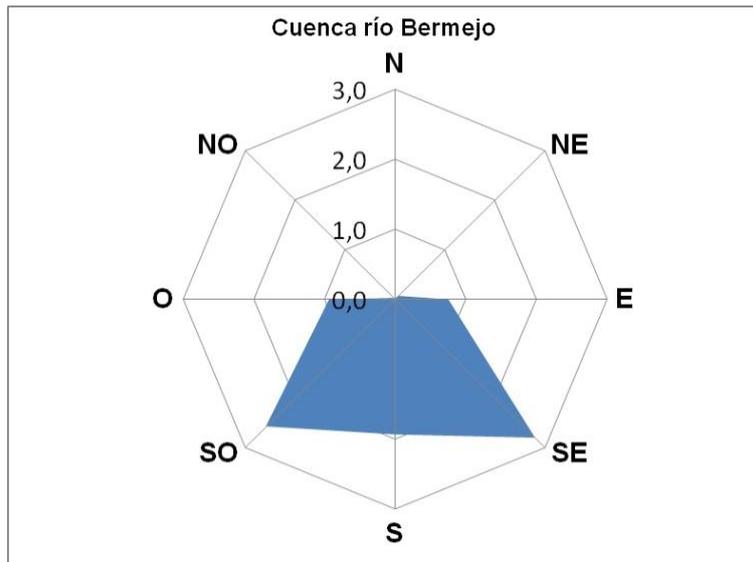


Figura 6. Orientación de las geoformas inventariadas, en términos de su área (km²).
Figure 6. Orientation landforms inventoried, in terms of their area (km²) in the high Bermejo river basin.

El tamaño de las geoformas varía entre 0.01 y 0.8 km²; la mayoría (76%) tiene entre 0.01 y 0.05 km², cubriendo una superficie de 3.6 km², el 16 % tiene entre 0.05 y 0.1 km², alcanzando 2.35 km², el 7% entre 0.1 y 0.5 km² con un área de 2.38 km² y el 0.4%, entre 0.5 y 1 km² y solo una unidad de 0.8 km² (Figura 7).

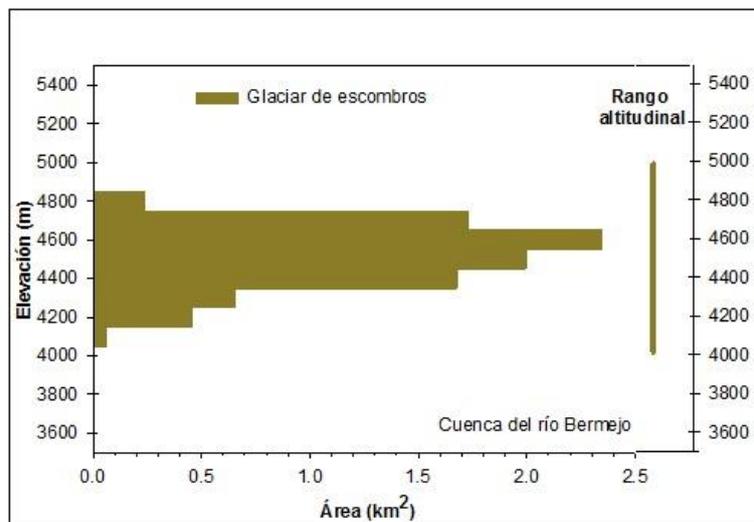


Figura 7. Distribución del número y superficie de los glaciares de escombros inventariados, cuenca alta del río Bermejo.
Figure 7. Distribution of the number and area of rock glaciers inventoried, high Bermejo river basin.

Los glaciares de escombros se localizan por encima de los 4000 m s.n.m., con un rango de altura que va desde los 4010 a 4896 m s.n.m. y de 4128 a 4861 m s.n.m. para los activos, presentando la mayor concentración areal (2.35 km²) de geoformas alrededor de los 4600 m s.n.m. (Figura 8).

Los glaciares de escombros activos se encuentran a partir de 4128 m s.n.m. y sus frentes presentan pendientes superiores al ángulo de reposo (Figura 2D y E). Los glaciares de escombros inactivos aparecen a 4010 m s.n.m., tienen hundimientos pronunciados y frentes deteriorados con menores pendientes. Los sistemas de glaciares de escombros multilobulados por superposición de eventos (Figura 2A) y multiraíz (Figura 2C) tienen desarrollos superficiales importantes.

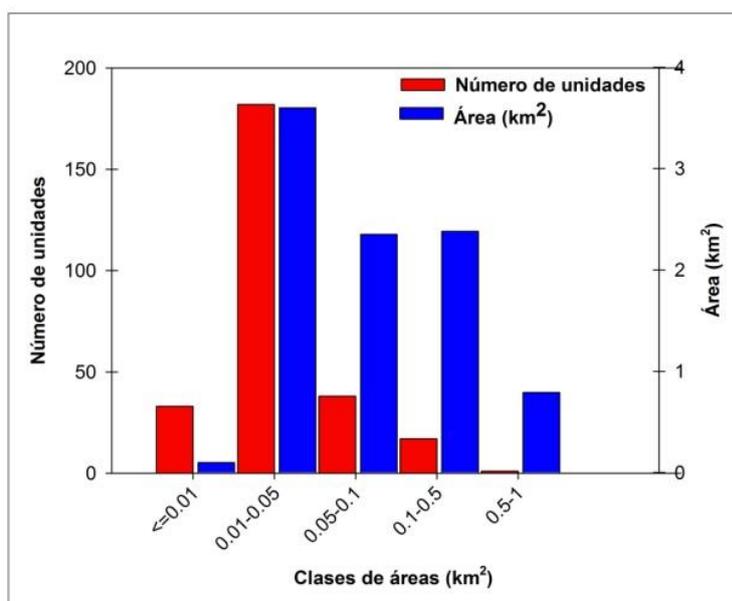


Figura 8. Hipsometría de los glaciares de escombros, cuenca río Bermejo (subcuencas Iruya, Condado y Los Toldos-Lipeo).

Figure 8. Rock glaciers hypsometry, Bermejo River basin (sub basins: Iruya, Condado- Los Toldos and Lipeo).

La validación en terreno de las geoformas fue relevante, con un 90% de eficacia. Se controlaron en total 27 unidades de las geoformas mapeadas.

Se identificaron otras geoformas asociadas hidrológicamente a los glaciares de escombros: vegas que crecen a expensas de estas geoformas (Figura 2A y E) indicando su integración y dependencia del sistema hídrico vinculado al permafrost de montaña. Evidencian formas menores adjudicadas al congelamiento estacional y son indispensables para la conservación de la biodiversidad de altura.

En la misma relación se reconocieron lagunas someras que crecen en el borde de glaciares de escombros y presentan variaciones estacionales en sus contenidos hídricos (Figura 9). Durante el período estival alcanzan su máxima extensión y durante el invierno decrecen o se secan. Las vegas y las lagunas son utilizadas por los pobladores como aguadas y zonas de pastoreo en el verano.

Se informan algunos datos de caudales obtenidos durante la primavera (Tabla 2). El mayor caudal fue registrado a los 4087 m s.n.m., coincidente con las mayores temperaturas del aire y del agua registrada. En tanto que el menor caudal se registró a los 4211 m s.n.m. Las menores temperaturas del aire y del agua se registraron a mayor altura (4384 m s.n.m.).

Los procesos periglaciales estacionales son activos en la región. En la Figura 3A y B se puede observar hielo lenticular en el suelo. En la Figura 3C y D se observa estructura sacarosa producto de la formación de lenticulas de hielo (Figura 3B).

En el frente de los glaciares de escombros en la capa superior, se observa selección vertical o gradación inversa. En los niveles inferiores aparecen nidos de rodados, (open work gravels), producto de los fenómenos de crecimiento de hielo de segregación.

Latitud	Longitud	Altura (m snm)	T° Aire (°C)	T° Agua (°C)	Caudal (L/Seg)	Fecha
22° 24' 07.2"	65° 14' 40.0"	4087	10.0	9.3	25	06/10/2011
22° 23' 34.9"	65° 16' 13.7"	4211	6.6	5	2	06/10/2011
22° 12.5'	65° 19.93'	4365	10.1	8	4	25/11/2011
22° 12' 52.9"	65° 11' 14.8"	4384	2.5	4.6	19	06/10/2011

Tabla 2. Localización de lecturas y datos de caudal en cuencas periglaciales.

Table 2. Measurements location and flow data in periglacial basins.

En sectores de la superficie superior de los glaciares de escombros se producen suelos estructurados con extrusión en algunos casos, procesos activos actuales de la capa activa (Figura 3E

y F). En otros glaciares de escombros se pueden observar crestas indicadoras de movimiento de la geoforma (Figura 2D).

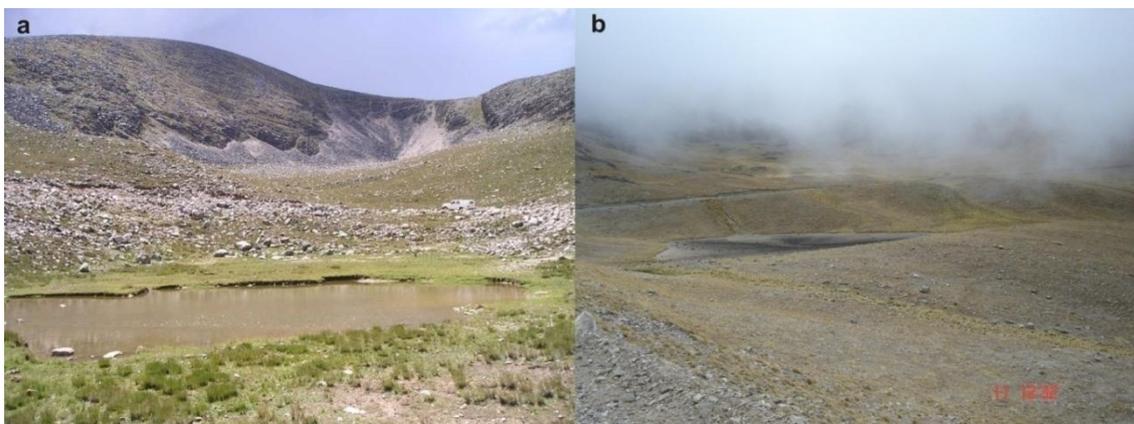


Figura 9. Lagunas: a). laguna en verano; b). laguna en invierno.
Figure 9. Lagoons: a). pond in summer; b). pond in winter.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Se ha aplicado el uso de herramientas geomáticas y técnicas geomorfológicas para la obtención del inventario de glaciares de escombros (permafrost reptante) en la alta cuenca del río Bermejo. A la vista de los resultados, la utilización de imágenes satelitales de mayor resolución y MDE al alcance de los usuarios, tienen que ser considerados de fundamental importancia para estudios de recursos estratégicos detallados y regionales. En este caso, demostraron no ser sólo una herramienta complementaria de actividades de campo y optimización de tiempo con racionalización de recursos (humanos y económicos) sino también aportar a las mejoras en la interpretación y obtención de información específica a nivel regional. Las bases de datos generadas permitirán hacer un seguimiento para evaluar las modificaciones o no de los recursos aquí inventariados.

El inventario de glaciares de escombros activos e inactivos localizados en la alta cuenca del río Bermejo arrojó la identificación en la región de 253 glaciares de escombros activos e inactivos (intactos), que contienen permafrost y cubren una superficie de 9.12 km². Esta información permite registrar la ubicación y estado de reservas congeladas de agua dulce en la alta cuenca del río Bermejo.

Los datos fueron ajustados a un mapa a escala 1:35000, para mejorar la visualización de las geoformas inventariadas que en su mayoría tiene superficies que van entre 0.01 km² a 0.05 km². Esto se logró mediante la propiedad específica del programa QGIS.

Trombotto et al. (1999) establecen para los Andes de Mendoza la presencia de permafrost de montaña en las cercanías de la isoterma de 0°C y también en ubicaciones con temperaturas positivas. Brenning (2005) lo determina a valores 0.5°C y una altura de 3500 m s.n.m., coincidente con la mayor concentración de glaciares de escombros en los Andes Centrales chilenos y reconoce la ocurrencia de glaciares de escombros intactos a 3000 m s.n.m. donde se instala la isoterma actual de 4°C. En los Andes intratropicales, Bodin et al. (2010) informa para Caquella, glaciar de escombros tropical (21.5°S) con 20 años de monitoreo, localizado a 5250 m s.n.m., coincidente aproximadamente con la isoterma de 0°C, un estado de degradación potencial del permafrost con la presencia de permafrost cálido.

La isoterma de temperatura media anual del aire se encuentra a 4600 m s.n.m. en la región de trabajo. La distribución hipsométrica muestra la mayor concentración de áreas (2.35 km²) de glaciares de escombros a los 4600 m s.n.m., en concordancia con los valores calculados de temperatura media anual del aire, lo que nos permite estimar el límite inferior del permafrost a una altura de 4600m s.n.m.

Los glaciares de escombros ubicados por debajo de los 4600 m s.n.m. hasta los 4010 m s.n.m., se encuentran en el marco de temperaturas medias anuales del aire positivas: 5.1°C es la temperatura media anual del aire extrapolada para 4000 m s.n.m. Esto indicaría que este grupo de glaciares de escombros activos e inactivos (4.57 km²), aproximadamente 50% del área total inventariada) estarían

en desequilibrio con las condiciones climáticas presentes, con permafrost de tipo templado o azonal, con altas probabilidades de degradación.

La presencia de fenómenos de congelamiento de suelos en la región constituye la manifestación de procesos periglaciales activos actualmente.

Las temperaturas del agua pueden estar influenciadas por la distancia entre la salida del agua y el punto de lecturas o evidenciar un proceso de descongelamiento de las geoformas de origen (inactividad). Los caudales medidos reflejan parcialmente, la importancia local de la contribución del sistema periglacial a las cuencas. Es necesario realizar monitoreo a largo plazo para obtener bases de datos que permitan establecer con precisión los aportes de caudal de estas geoformas a la cuenca.

Aunque el permafrost reacciona a las modificaciones climáticas más lentamente que los glaciares descubiertos, el piso altitudinal entre los 4000 y 4600 m s.n.m. debería ser monitoreado instrumentalmente para prevención de riesgo. Este nivel es utilizado habitualmente por las comunidades indígenas para pastoreo y alberga una gran biodiversidad asociada a vegas y lagunas vinculadas hidrológicamente a los glaciares de escombros.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido posible gracias al apoyo logístico, instrumental y financiero de la Fundación Miguel Lillo y del IANIGLA. Agradecemos la lectura crítica del manuscrito a dos árbitros y las sugerencias editoriales de los editores invitados (Dr. Charles K. Toth y Dra. María Gabriela Lenzano). Los autores agradecen a los técnicos Sr. Ricardo Brizuela y la Srta. Natalia González Díaz.

REFERENCIAS

- Bajracharya S.R. y Shrestha, B., (2011). The status of glaciers in the Hindu Kush Himalayan region. ICIMOD, Kathmandú, 130 p.
- Barsch, D. (1996). Rockglaciers. Springer, Berlin, 331 p.
- Bianchi, A.R. y Yañez, C.E., (1992). Las Precipitaciones en el Noroeste Argentino. Segunda edición. INTA, Salta, Argentina.
- Brenning A., 2005. Geomorphological, hydrological and climatic significance of rock glaciers in the Andes of Central Chile (33°-35°). Permafrost Periglacial Processes, 16: 231-240.
- Bodin, X., Francou, B., Arnaud, Y., Fabre, D., (2010). State and dynamics of a tropical rock glacier on the Altiplano (Bolivia, 21.5°S) during the last two decades. Ice and Climate Change: A View from the South (VICC 2010), Valdivia (Chile): 62.
- Burger, K.C., Degendhart J.J Jr., Giardino, R., (1999). Engineering geomorphology of rock glaciers. Geomorphology, 31: 93-132.
- Castro, M., Delgado, S., Ferri-Hidalgo, L., Salazar, L., Falaschi, D., Lenzano, G., Masiokas, M., Pitté, P., Ruiz, L., (2012). Manual para la realización del Inventario Nacional de Glaciares y Ambiente Periglacial. IANIGLA-CONICET. Inédito, 139 pp.
- COBINABE, (1995). Comisión Binacional para el desarrollo de la Alta cuenca del Río Bermejo y el Río Grande de Tarija.
- Corte, A., (1976). The hydrological significance of rock glaciers. Journal of Glaciology, 17: 157-158.
- Corte, A., (1978). Rock glaciers as permafrost bodies with debris cover as an active layer. A hydrological approach. Andes of Mendoza, Argentina. Proceedings of the Third International Conference on Permafrost, Edmonton, Alberta, Canadá: 262-269.
- Gorbunov, A.P., (1978). Permafrost investigation in high- mountain regions. Arctic and Alpine Research, 10 (2): 283-294.
- Haeberli, W., (1985). Creep of mountain permafrost, internal structure and flow of Alpine Rock Glaciers. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie 77 Zurich, Switzerland, 142 p.
- Haeberli, W. y Beniston, M., (1998). Climate Change and its impacts on glaciers and permafrost in the Alps. Ambio, 27(4): 258-265.
- IANIGLA, (2010). Inventario Nacional de Glaciares y Ambiente Periglacial. Fundamentos y Cronograma de Ejecución. <http://www.glaciares.org.ar/upload/CronogramaInventarioGlaciaresIANIGLA.pdf>.
- IPCC, (2001). Cambio climático 2001: la base científica. Parte de la contribución del Grupo de trabajo I al Tercer Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). J. T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden y D. Xiaosu (Eds.). <http://www.ipcc.ch>.
- IPCC, (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the IPCC 5th Assessment Report. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.

- Kull, C., Hanni, F., Grosjean, M., Veit, H., (2003). Evidence of an LGM cooling in NW Argentina (22° S) derived from a glacier climate model. *Quaternary International*, 108: 3–11.
- Masaguer, G., (2009). Determinación e inventario de geofomas de permafrost andino en una cuenca de la Sierra de Santa Victoria. Seminario de la Carrera de Geología para optar al título de Geólogo. Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo, Universidad Nacional de Tucumán. Inédito, 120 p.
- Minetti, J.L., (2005). El clima del Noroeste Argentino. Laboratorio Climatológico Sudamericano. Fundación Carl C. zon Caldenius, Tucumán, 350 p.
- Racoviteanu, A.E., Paul, F., Raup, B., Khalsa, S.J.S., 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*, 53: 53-69.
- Ruthsatz, B. y Movia, C. (1975). Relevamiento de las estepas altoandinas del noroeste de la provincia de Jujuy, República Argentina. Fundación Educación, Ciencia, Cultura. Buenos aires, 127 p.
- Schäbitz, F., Lupo, L., Kulenmeyer, J.A., Kulenmeyer, J.J., (2001). Variaciones en la vegetación, el clima y la presencia humana en los últimos 15.000 años en el borde oriental de la Puna, provincias de Jujuy y Salta, noroeste argentino. *Asociación Paleontológica Argentina, Publicación especial 8, XI Simposio Argentino de Paleobotánica y Palinología*: 155-162.
- Schrott, L., (1994). Die Solarstrahlung als steuernder Factor im Geosystem der subtropischen semiariden Hochanden, Agua Negra, San Juan, Argentinien. *Heidelberger Geographische Arbeiten*, 94, 199 p.
- Stokes, C.R., Popovnin, V., Aleynikov, A., Gurney, S.D., 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: 95-213.
- Trombotto, D., (1991). Untersuchungen zum periglazialen Formenschatz und zu periglazialen Sedimenten in der "Lagunita del Plata", Mendoza, Argentinien. *Heidelberger Geographische Arbeiten* 90, 171 p.
- Trombotto D., (2000). Survey of cryogenic processes, periglacial forms and permafrost conditions in South America. *Revista de Instituto Geológico São Paulo* 21(1/2): 33-55.
- Trombotto, D.T. y Ahumada, A.L., (2005). Los fenómenos periglaciales. Identificación, determinación y aplicación. *Opera Lilloana* 45, 131 p.
- Trombotto, D.T. y Borzotta, E., (2007). Indicators of present global warming through changes in active layer-thickness, estimation of thermal diffusivity and geomorphological observations in the Morenas Coloradas rock glacier, Central Andes of Mendoza, Argentina. *Cold Regions Science and Technology*, 55: 321-330.
- Trombotto, D., Buk, E., Hernández, J., (1999). Rock glaciers in the Southern Central Andes (appr. 33° S.L.), Mendoza, Argentina: a review. *Bamberger Geographische Schriften*, 19: 145-173.
- Tucker, C.J., Grant, D.M., Dykstra J.D., (2004). NASA's global orthorectified Landsat data set. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(3): 313-322.
- Van Everdingen, R. ed., (1998). Multi-language glossary of permafrost and related ground-ice terms. The University of Calgary-Boulder, CO, National Snow and Ice Data Center/ World data Center for Glaciology, 207 p.
- Wahrhaftig, C. y Cox, A., (1959). Rock glaciers in the Alaska Range. *Geological Society of America Bulletin*, 70: 383-436.
- WGMS, (2008). Fluctuations of glaciers 2000-2005, Vol. IX. ICSU (FAGS)/IUGG (IACS)/UNEP/UNESCO/WMO. Zurich. 285 p.
- Zipprich M., Reizner, B., Veit, H., Zech, W., Stingl, H., (2000). Upper Quaternary landscape and climate evolution in the Sierra de Santa Victoria (northwestern Argentina) deduced from geomorphologic and pedologic evidence. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie* 7/8: 997-1012.

Recibido: 23-7-2013
Aceptado: 13-3-2014