

***III ENCUENTRO DE JÓVENES INVESTIGADORES***

**Metodología utilizada para el inventario de glaciares y geformas periglaciales en el tramo superior de la cuenca del río Santa Cruz. Cordillera Frontal. San Juan. Argentina.**

**Estudios de la tierra y el espacio, Cambio Climáticos y Naturales. Catástrofes Naturales.**

**Departamento de Geología - FCEFyN - UNSJ**

## INTRODUCCIÓN

El conocimiento de las reservas y recursos naturales de una provincia, región o país es de vital importancia para su desarrollo. En territorio argentino se establece, según la Ley Nacional N° 26.639, la protección de los glaciares y geoformas del ambiente periglacial con el objeto de preservarlos como reservas estratégicas de recursos hídricos para el consumo humano, para la agricultura, 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.

Este conocimiento refiere a la identificación y localización de los diferentes tipos de glaciares (descubiertos, cubiertos y de escombros) y geoformas tanto de ambiente glacial como periglacial (manchones de nieve, prótalus rampart, lóbulos de geliflución, etc). También para la caracterización de estos cuerpos es necesario determinar su morfología superficial, estructura interna, distribución altitudinal, orientación, pendiente, área, contenido de hielo interno, etc.

Es de vital importancia el desarrollo de trabajos de este tipo para tener un conocimiento completo sobre la presencia de estos cuerpos, tanto en la provincia de San Juan, como en el resto del país. Lo que posibilitará una mejora en la toma de decisiones, teniendo en cuenta un manejo integral de las cuencas hidrográficas.

En el área de estudio solamente han sido reconocidas geoformas propias del ambiente periglacial, no encontrando ningún glaciar descubierto, cubierto o manchón de nieve perenne. Lo cual indica que esta zona se encuentra completamente en ambiente periglacial.

Si bien en San Juan se han realizado estudios de diversa índole en las geoformas del ambiente periglacial (Crocce and Milana, 2002; Schrott 1991, 1996 y 1998; Arenson *et al*, 2010; Perucca and Esper Angillieri, 2011; Esper Angillieri, 2009), hasta la fecha no se han realizado estudios sistemáticos y de detalle que permitan estimar la importancia de las geoformas de ambiente periglacial en el sistema hidrológico- hidrogeológico.

Este trabajo constituye un pequeño aporte en busca de un mayor conocimiento sobre esta temática.

El área de estudio se encuentra en el tramo superior de la cuenca del río Santa Cruz, correspondiente al sector sur-oeste de la provincia de San Juan, en el departamento de Calingasta, perteneciente a la provincia geológica de Cordillera Principal. Esta zona se encuentra localizada entre los 31°44' y los 31°55' de Latitud Sur y los 70°11' y los 70°28' de Longitud Oeste aproximadamente. Coincidiendo su divisoria de agua en el sector oeste y sur con el límite internacional con la República de Chile.

## **FUNDAMENTACIÓN Y METODOLOGÍA**

La provincia de San Juan, al igual que otras provincias del país, se ubica al pie de grandes cadenas montañosas. Esta ubicación genera que la disponibilidad de agua presente en los oasis esté directamente vinculada a los procesos presentes en la Cordillera de Los Andes. Las precipitaciones, tanto sólidas como líquidas, ocurridas en cordillera representan la principal fuente de abastecimiento de agua de la población de provincias cordilleranas. Del total de agua caída en cordillera, que no es evaporada ni interceptada, puede escurrir de forma superficial por los ríos, puede quedar almacenada en estado sólido en glaciares (descubiertos, cubiertos y/o de escombros), o puede infiltrarse y recargar los acuíferos. Tanto el aporte de agua proveniente del deshielo de los glaciares, como el aporte de los acuíferos en los diferentes valles es de suma importancia para el consumo de la población humana y la realización de todas sus actividades.

Es debido a esta importancia que es necesario entender el rol que cumplen los glaciares de escombros y geoformas del ambiente periglacial en el ciclo hidrológico- hidrogeológico.

La metodología utilizada en este trabajo consistió en primera instancia, en la delimitación de las sub cuencas y trazado de la red hidrográfica de la zona de estudio, la cual, se realizó en forma automática (a través del software SAGA GIS) y en forma manual. Posteriormente se realizó el reconocimiento de las diferentes geoformas presentes en el área de estudio a través de la utilización de imágenes satelitales de distintas plataformas (Landsat, Terra y Cbers-2B) con diferentes resoluciones espaciales y fechas de toma. Posteriormente, se hicieron los correspondientes controles de campo, donde se observó que las geoformas y los límites de las mismas observados en las imágenes satelitales coincidieran con lo visto en el campo. También se realizó la identificación y mapeo de geoformas que en la

imagen aparecieran en sectores de sombra. Una vez reconocidas todas las geoformas presentes, esta información junto con la red hidrográfica y los límites de sub cuencas fueron volcadas en una plataforma SIG (Kosmo). A través de esta plataforma, se llevaron adelante los cálculos necesarios para obtener datos de altura máxima, media y mínima, área, orientación, pendiente, latitud y longitud de centroide de cada uno de los cuerpos inventariados.

Debido a la importancia de conocer la cantidad y tipo de geoformas presentes en cada sub cuenca, se realizó una codificación de la red de drenaje, lo cual permite que todas las geoformas que se encuentren dentro de la misma sub cuenca posean el mismo código numérico y un código en letras que permite diferenciar los tipos de geoformas. Esta clasificación se hizo teniendo en cuenta los trabajos de Muller et al (1977), la "Guía para Inventarios Preliminares de Glaciares" de la TTS para el Inventario Mundial de Glaciares y los aportes del "Inventario de Glaciares de la Cuenca del Río Mendoza" (Corte y Espizúa, 1981).

Por último, como producto resultante de este trabajo, se confeccionó cartografía que incluye todas las geoformas inventariadas y se construyó la base de datos con todos los datos asociados a cada una de las geoformas.

## **DESARROLLO**

### **Obtención de Imágenes Satelitales y Modelo Digital de Elevación (MDE)**

Desde el sitio web dependiente del Servicio Geológico de los Estados Unidos fueron descargadas las imágenes del satélite Landsat 5 sensor TM, las cuales fueron utilizadas como base para georreferenciar las imágenes Aster. La resolución espacial de estas imágenes es de 30 metros en el espectro visible, infrarrojo cercano y medio.

Para las imágenes del sensor Aster del satélite Terra se empleó el producto del centro distribuidor de datos LP DAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center) que corresponde a imágenes Aster Level-1A orto-rectificadas, en formato GeoTIFF. La resolución espacial de estas imágenes es de 15 metros para las bandas del espectro visible e infrarrojo cercano, de 30 metros para las bandas del infrarrojo medio y de 90 metros para las bandas del infrarrojo termal.

Un tercer tipo de imágenes utilizadas corresponde a las imágenes del sensor HRC (High Resolution Panchromatic Camera) del satélite CBERS 2B (China Brasil Earth Resources Satellite), con una resolución espacial de 2.7 metros y han sido obtenidas desde la página web del Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

El MDE también fue descargado del sitio web del Servicio Geológico de los Estados Unidos. Se utilizó el Aster GDEM v2 con resolución espacial de 30 metros.

### **Georreferenciación**

Se realizó a través del programa gvSIG versión 1.11.0, utilizando como base una imagen Landsat 5 TM del 15/01/1993 L1t. Se han colocado 41 puntos de control distribuidos uniformemente tanto horizontal como verticalmente, es decir, que cubren toda el área de la imagen y se encuentran en los sectores más bajos como los valles, en las cumbres y sectores de altitud media. El rms (Root Mean Square) es de 0,285, el cual, debe ser menor a la unidad, o sea, menor al tamaño del píxel (Figuras N° 8 y 9). En esta georreferenciación se utilizó transformación polinomial como algoritmo de georreferenciación, con orden 1 y método de vecino más próximo.

### **Delimitación de sub cuencas y generación de red de drenaje**

Los modelos digitales de elevación pueden traer errores y esto hace necesario un pre procesamiento para su corrección. Este error se debe a la falta de coordenada Z en algunos píxeles, y esto suele suceder principalmente en regiones montañosas en los sectores que se encuentran en sombra. Esta falta del valor altimétrico produce errores al momento de generar la divisoria de cuencas y la red de drenaje. La corrección se ha realizado en el programa SAGA tomando como algoritmo el de Planchon/Darboux (2001), y como resultado se ha generado un nuevo MDE con todos los sumideros rellenos.

Para la creación de la red de drenaje se generó un parámetro para la iniciación de los canales, para lo cual se debió crear una grilla de iniciación para los canales calculando una jerarquía de los futuros canales de la red de drenaje, lo cual se realizó a través de la función de Strahler Order. Una vez que ha sido generada la grilla de iniciación, se procedió a realizar la red de drenaje. Se realizó la red de drenaje utilizando como grilla de iniciación el Catchment Area (área de captura), con una longitud mínima de 100 celdas.

Una vez generada la red de drenaje se pudo realizar la divisoria de subcuencas. Cada segmento de la red de canales creado en el paso anterior tiene asociada una cuenca. Esta cuenca corresponde al área de aporte (catchment area) del punto más bajo del segmento menos la cuenca asociada a otro segmento localizado más arriba.

Tanto la creación de la red de drenaje como la divisoria de subcuencas fueron generadas a través del programa SAGA GIS, con el módulo de análisis del terreno.

### **Reconocimiento y mapeo de glaciares de escombros y geoformas de ambiente periglacial**

Debido a que no existe una metodología que nos permita realizar una clasificación automática de estas geoformas como en el caso del hielo descubierto, es que se ha tomado como base el reconocimiento visual a partir de imágenes con diferentes resoluciones espaciales. Para este reconocimiento se ha tenido en cuenta las características morfológicas de las mismas. Los glaciares de escombros, poseen características morfológicas superficiales que permiten reconocerlos a través del análisis visual de imágenes. Los glaciares de escombros activos poseen un talud frontal y lateral con una pendiente superior a los 30°, como así también, presentan estructuras de surcos y crestas tanto longitudinales como transversales y lóbulos que denotan movimiento en el mismo, no existe presencia de vegetación, se observan derrumbes en el frente y laterales y los clastos o bloques presentan caras frescas. Los glaciares de escombros inactivos, se encuentran en un proceso de pérdida de hielo tanto intersticial como masivo, lo que conlleva a una depresión general de la estructura del glaciar. Dando como resultado, taludes inferiores a 30°, estructuras colapsadas y posible presencia de vegetación en superficie. Por su parte, en los glaciares de escombros fósiles (han perdido completamente el hielo interno) la presencia de vegetación es importante y aparecen como una acumulación de material detrítico.

### **Control de campo**

El control de campo y la descripción geomorfológica se ha realizado principalmente sobre la quebrada del río Santa Cruz y del río Pachón. En total han sido revisadas 27 geoformas, de las cuales, 7 corresponden a glaciares de escombros activos, 11 a

glaciares de escombros inactivos y 9 a protalus rampart. Estas 27 geoformas representan el 14 % de las geoformas inventariadas en el área de estudio.

Existen geoformas de ambiente periglacial de menor tamaño, no reconocibles a través de las imágenes satelitales, que han sido identificadas en el campo y descritas. Se ha podido observar estructuras criogénicas, tales como suelos estructurados del tipo bandas, los cuales poseen formas lineales y se originan a partir de una combinación de procesos en donde intervienen el levantamiento por hielo acicular, selección, reptación del suelo, deshidratación y contracción térmica, por la acción del congelamiento y descongelamiento. También son reconocibles otras geoformas, como las laderas con procesos de soliflujión. En ellas, debido a un lento movimiento de reptación de un suelo saturado, se puede reconocer una superficie lobulada. Esta reptación es producto del congelamiento y descongelamiento que sufre estacionalmente la capa activa.

### **Generación de plataforma SIG**

Los datos resultantes de la generación de la red de drenaje, delimitación de sub cuencas y mapeo de glaciares de escombros y otras geoformas del ambiente periglacial fueron volcados junto con el Modelo Digital de Elevación (MDE) en el programa Kosmo para la creación de la base de datos.

Dicha base de datos contiene por cada uno de los cuerpos inventariados varios campos. Dentro de los parámetros generales tenemos los campos de Provincia, Cuenca, Sub cuenca, ID Local y Tipo de Geoforma. Dentro de los parámetros físicos tenemos los campos de Latitud, Longitud, Área, Altura máxima, mínima y media, Orientación y Pendiente media. También se ha realizado una clasificación de los glaciares de escombros siguiendo la propuesta realizada por los especialistas del Instituto Argentino de Nivología y Glaciología (IANIGLA), en la cual se clasifica según el origen, actividad, forma y estructura.

## **RESULTADOS**

### **Superficie total cubierta por tipo de geoforma**

El área de estudio posee un área de 431,95 Km<sup>2</sup>, de los cuales, como se puede observar en la tabla 1, 13,94 Km<sup>2</sup> corresponden a crioformas de ambiente periglacial.

Existe un amplio predominio de los glaciares de escombros inactivos (59,47% de la superficie total englazada) sobre los glaciares de escombros activos (35%) y los protalus rampart (5,53%). En cantidad de cuerpos inventariados, los glaciares de escombros inactivos son los de mayor cantidad, con 123 cuerpos, seguido por los protalus rampart, con 51 cuerpos, y en último lugar, los glaciares de escombros activos con 25 cuerpos. Si bien los protalus rampart son las geoformas que menor extensión representan, se encuentran en segundo lugar en cantidad de cuerpos inventariados, lo que nos indica que a pesar de su presencia abundante son cuerpos de tamaño muy pequeño.

Tabla 1: Superficie englazada y cantidad de cuerpos según tipo de geoforma

<i>Tipo de geoforma inventariada</i>	<i>Área (Km<sup>2</sup>)</i>	<i>Cantidad de cuerpos</i>
Glaciar de escombros activo	4,88	25
Glaciar de escombros inactivo	8,29	123
Protalus rampart	0,77	51
<b>Total</b>	<b>13,94</b>	<b>199</b>

### Orientación de los cuerpos inventariados

El Gráfico N° 1 indica que la gran mayoría de los cuerpos inventariados presentan una orientación media principalmente hacia el sur, y en menor medida hacia el sureste y suroeste, mientras que los cuerpos con orientación norte, noreste o noroeste son muy escasos. Esto se debe a que las laderas que miran hacia el sur en nuestro hemisferio reciben menos radiación solar que las laderas que miran hacia el norte, favoreciendo la permanencia de nieve y hielo por mayor tiempo, lo cual ayuda a los procesos que originan los glaciares y crioformas.

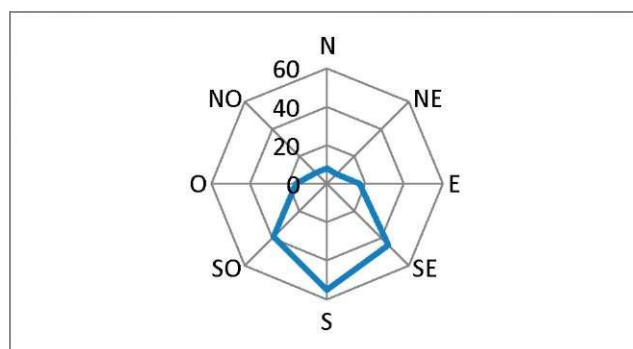


Gráfico N° 1: Orientación de los cuerpos inventariados



## Distribución de los cuerpos inventariados según clases de área

La cantidad de cuerpos de hielo inventariados decrece a medida que el tamaño de las clases de áreas aumenta, presentando una gran desproporción entre la primera clase y el resto, ya que ésta posee aproximadamente el doble de cuerpos que el resto de las clases juntas (Gráfico N° 2). Por otro lado, el área ocupada por cada clase presenta un comportamiento distinto, ya que presenta una distribución aproximadamente normal, con el pico de área ocupada en la clase de 0,1 -0,5 Km con 5,63 Km<sup>2</sup>. El resto de las clases poseen áreas aproximadamente similares.

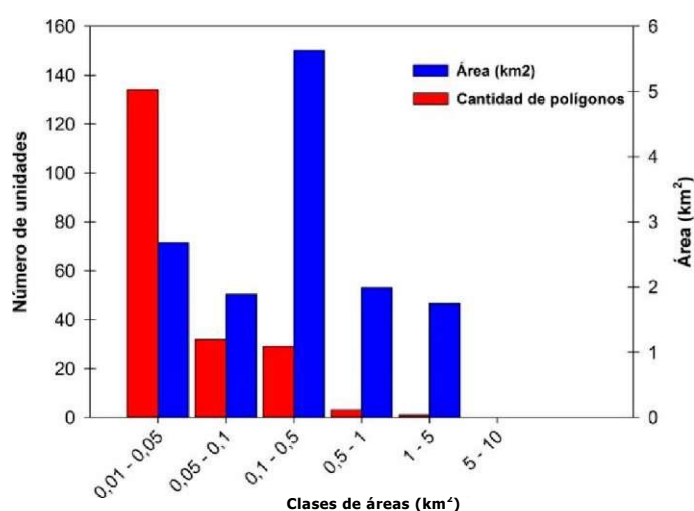


Gráfico N° 2: Cantidad de cuerpos inventariados según clases de áreas

## Hipsometría de cuerpos de hielo

La disposición altitudinal (Gráfico N° 3) no muestra ningún tipo de estratificación entre los diferentes tipos de geoformas. Los 3 tipos de geoformas se presentan entre los 3600 msnm y los 4700 msnm, lo que representa un rango de aparición de estas geoformas de 1100 metros.

Los glaciares de escombros activos son los que menor rango altitudinal presentan, apareciendo entre los 3708 msnm y los 4346 msnm. Por su parte, los glaciares de escombros inactivos y los protalus rampart aparecen a los 3512 msnm y 3502 msnm respectivamente, manteniendo su presencia hasta los 4664 msnm en el primer caso y hasta los 4357 msnm en el segundo caso (Tabla 8).

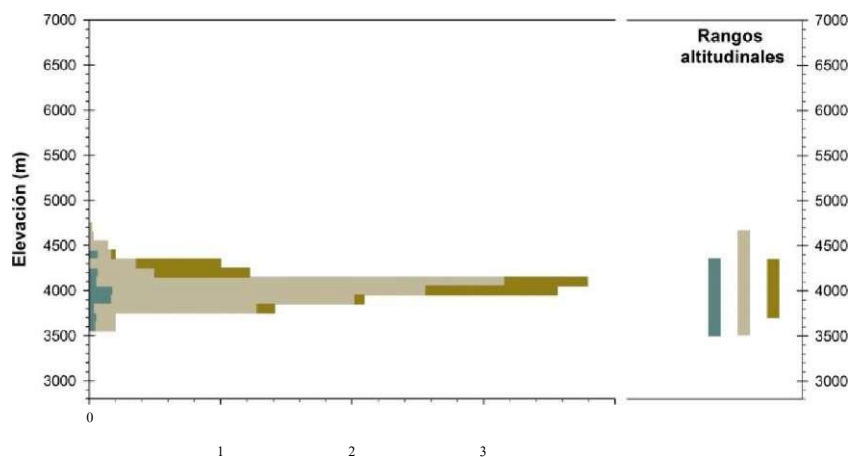


Gráfico N° 3: Hipsometría. En color azul se representan los Prótalus Ramparts, en color gris los glaciares de escombros inactivos y en color mostaza los glaciares de escombros activos.

## CONSIDERACIONES FINALES

En primera instancia es importante destacar el uso de las herramientas informáticas aplicadas al inventario de geoformas de ambiente periglacial. Dado que a partir de un Modelo Digital de Elevación, estas herramientas, permiten realizar un análisis digital del terreno con la consiguiente elaboración de la red de drenaje y divisoria de subcuencas, que actúan como cartografía de base para la realización del inventario. Es importante destacar que el uso de estas herramientas informáticas brinda la posibilidad de realizar estas tareas en un tiempo muy breve si se lo compara con el tiempo que llevaría realizar las mismas tareas en forma manual. No obstante, siempre es necesaria la supervisión de quien está realizando el trabajo para corregir posibles errores de los resultados que entregan los programas.

Por otro lado, señalar la importancia de conocer la localización, distribución y características de estas geoformas. Lo que, en conjunto, con estudios interdisciplinarios y de mayor detalle, va a permitir un mejor entendimiento de los procesos que originan estas geoformas y su relación con el resto del sistema, especialmente con el ciclo hidrológico-hidrogeológico.

También señalar la sensibilidad que estas geoformas presentan ante pequeñas perturbaciones, ya sean naturales o antrópicas, que puedan sufrir.

## BIBLIOGRAFÍA

- Arenson, L., Pastore, S., Trombotto, D., Bölling, S., Quiroz, M. y Ochoa, L. 2010. Characteristics of two Rock Glaciers in the Dry Argentinean Andes Based on Initial Surface Investigations. GEO2010. Calgary, Alberta.
- Corte, A. E. and L. E. Espizua. 1981. Inventario de glaciares de la cuenca del rio Mendoza. IANIGLA-CONICET. Mendoza. 64 p.
- Croce, F. y Milana, J.P. 2002. Internal Structure and Behaviour of a Rock Glacier in the Arid Andes of Argentina. *Permafrost Periglacial Processes*. 13: 289-299.
- Esper Angillieri, M. Y., 2009. A preliminary inventory of rock glaciers at 30°S latitude, Cordillera Frontal of San Juan, Argentina: *Quaternary International*, 195, 151-157.
- Muller, F., Caflish, T. y Muller, G., 1977. *Instruction for compilation and Assemblage of Data for a World Glacier Inventory*. Temporary Technical Secretariat (TTS) for World Glacier Inventory, Internat. International Commission on Snow and Ice, Zürich.
- Perucca, L. and Esper Angillieri, M. Y., 2011. Glaciers and rock glaciers distribution at 28° SL, Dry Andes of Argentina, and some considerations about their hydrological significance. *Environ Earth Sci*, 64: 2079-2089.
- Schrott, L., 1991. Global Solar Radiation, Soil Temperature and Permafrost in the Central Andes, Argentina: a Progress Report. *Permafrost and Periglacial Processes*, Vol 2: 59-66.
- Schrott, L., 1996. Some geomorphological-hydrological aspects of rock glaciers in the Andes (San Juan, Argentina). *Zeitschrift für Geomorphologie*, SB 104, 161-173.
- Schrott, L., 1998. The hydrological significance of high mountain permafrost and its relation to solar radiation. A case study in the high Andes of San Juan, Argentina. *Bamberger Geogr. Schriften*, N° 15, pp. 71-84.