



# Estimación del volumen de agua contenido en geoformas del ambiente glacial y periglacial en un sector de los Andes Centrales ( $31^{\circ}45' - 32^{\circ}20'S$ ), San Juan, Argentina

Navas Romina <sup>a</sup>, Forte Ana Paula <sup>b</sup>, Ponce David <sup>c</sup>, Villarroel Cristian Daniel <sup>d</sup>, Morvillo Mónica <sup>e</sup>

<sup>a</sup> *Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales (UNSJ), Argentina, navas.romina@gmail.com.*

<sup>b</sup> *Centro de Investigaciones de la Geosfera y Biosfera (CIGEOBIO), Centro de Ciencia y Técnica (CCT) San Juan, Universidad Nacional de San Juan (UNSJ) y CONICET, Argentina, anapau.forte@gmail.com.*

<sup>c</sup> *Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA), Centro de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC), CONICET, Argentina, david\_ponce736@hotmail.com*

<sup>d</sup> *CIGEOBIO, CCT San Juan, UNSJ y CONICET, Argentina, cristiandv2001@yahoo.com.ar*

<sup>e</sup> *Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales (UNSJ), Argentina, mmorvillo@hotmail.com*

**RESUMEN:** En el ambiente glacial y periglacial de montaña en zonas áridas y semiáridas se encuentran importantes reservas de agua en estado sólido. Sin embargo, uno de los aspectos menos conocidos de los glaciares y geoformas periglaciales del mundo es su capacidad como reserva de agua. En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo obtener una aproximación de medidas de espesor y volumen de hielo de las geoformas del ambiente glacial y periglacial en un sector de los Andes Centrales de San Juan mediante la aplicación de fórmulas empíricas propuestas por diferentes autores. Para cuantificar las reservas de agua en estado sólido se llevó a cabo el siguiente procedimiento: análisis del inventario regional, estimación de espesor y estimación de volumen de agua equivalente. El cálculo estimativo de volumen de agua equivalente almacenado en glaciares y glaciaretos dio valores de 2,328 km<sup>3</sup>, de 3,267 km<sup>3</sup> y de 3,872 km<sup>3</sup>. Los glaciares cubiertos arrojaron valores que varían entre 0,265 Km<sup>3</sup> – 0,501 km<sup>3</sup>. En los glaciares de escombros activos el volumen de agua equivalente obtenido fue de 0,6 Km<sup>3</sup>-0,9 Km<sup>3</sup>. Mientras que en los glaciares de escombros inactivos el cálculo de agua equivalente obtenido se situó entre 0,107 km<sup>3</sup>-0,249 Km<sup>3</sup>.

**PALABRAS CLAVE:** Ambiente glacial; Ambiente periglacial; Estimación; Volumen de agua equivalente; Reservas de agua en estado sólido.

## 1 INTRODUCCIÓN

En los ambientes glaciales y periglacial de los Andes Centrales se encuentran reservas de agua en estado sólido. Estas reservas varían en una escala de tiempo comparable a las variaciones climáticas. En la actualidad el Cambio Climático Global afecta tanto a los ambientes glaciales como a los periglaciales de alta montaña en todo el mundo (Haeberli y Beniston, 1998). Estos ambientes reaccionan de manera sensible frente a dichos cambios (Ahumada, 2008).

El estudio de las reservas de agua en estado sólido es de gran importancia para evaluar la disponibilidad hídrica futura teniendo en cuenta la proyección del clima frente a distintos escenarios. Esto, además permite elaborar modelos hidrológicos ante futuros cambios en las condiciones climáticas. En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo realizar una estimación de espesor y volumen de agua equivalente de las distintas geformas inventariadas en la zona de estudio consideradas reservas de agua en estado sólido empleando distintas fórmulas matemáticas.

### 1.1 Área de estudio

La zona de estudio se encuentra ubicada al sur-oeste del departamento Calingasta, provincia de San Juan, Argentina, aproximadamente a 260 km de la ciudad de San Juan. Comprende los cordones montañosos conocidos localmente como La Ramada, Espinacito, Pichiregüas, Contrabandistas, Hornillas y Mercedario; y ha sido seleccionada por presentar un amplio desarrollo del ambiente glacial y periglacial. La zona de trabajo abarca una superficie total de aproximadamente 2.470 km<sup>2</sup> y está comprendida entre las coordenadas geográficas 31°47' - 32°20' de latitud sur y 70°00' - 70°20' de longitud oeste (Figura 1). La misma se encuentra dentro de la cuenca del río San Juan en las subcuencas hidrológicas del río Blanco y río de Los Patos.

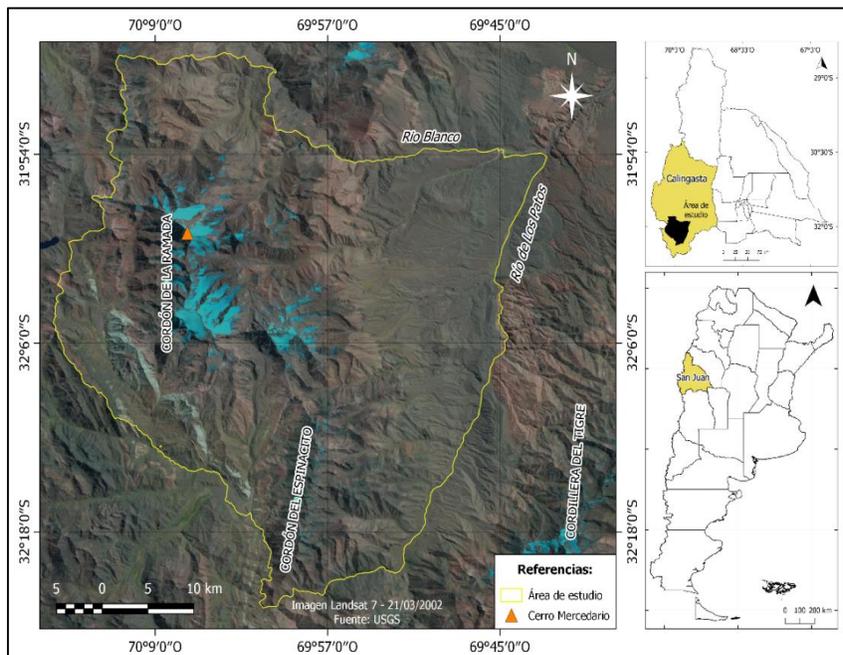


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

## 2 METODOLOGÍA

Para cuantificar las reservas de agua en estado sólido de las diferentes geformas en el ambiente glacial y periglacial se llevaron a cabo los siguientes procedimientos: análisis del inventario regional, estimación de espesor y estimación de volumen de agua equivalente. A continuación, se detalla cada una de ellas:

## 2.1 Análisis del Inventario Regional

En primer lugar, para la realización del cálculo de volumen de agua equivalente, se utilizó un inventario regional de las geoformas del ambiente glacial y periglacial (Forte *et al.*, 2017a) (Figura 2). Este inventario fue realizado en base a observaciones geomorfológicas y contrastado con estudios de dinámica superficial usando el método DinSAR sobre imágenes radar.

Debido a que el presente trabajo se basa en la estimación de espesor y volumen a partir de ecuaciones empíricas preexistentes, en este trabajo se consideraron las geoformas correspondientes a: glaciares descubiertos, glaciaretos, glaciares cubiertos y glaciares de escombros activos e inactivos.

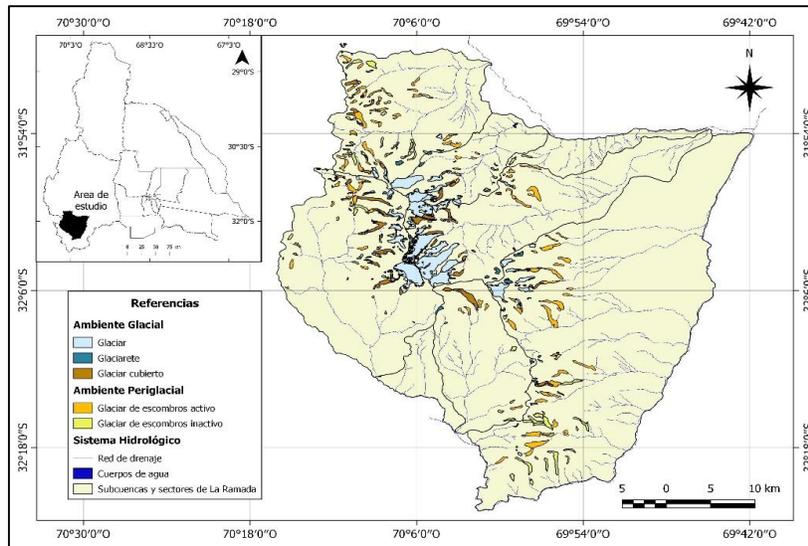


Figura 2. Inventario regional del ambiente glacial y periglacial del Cordón de La Ramada y alrededores (Forte *et al.*, 2017a).

## 2.2 Estimación de espesores

En este trabajo se aplicaron fórmulas matemáticas, empleados por distintos autores, basados en parámetros geométricos.

### Glaciares y glaciaretos

Para determinar el espesor de glaciares y glaciaretos se utilizó la ecuación empírica propuesta por Chen y Ohmura (1990), utilizada posteriormente por Azócar y Brenning (2010) en los Andes Centrales de Chile y por Perucca y Esper Angillieri (2011) en los Andes Desérticos de Argentina:

$$H \text{ (m)} = 28,5 \times [\text{área (km}^2)]^{0,357}$$

### Glaciares cubiertos

Para obtener el espesor de estas geoformas se aplicó la siguiente ecuación empírica:

$$H \text{ (m)} = 39,3 \times [\text{área (km}^2)]^{0,28}$$

Esta fórmula ha sido utilizada previamente en otros trabajos de estimación de espesores y volumen de agua equivalente (Janke *et al.*, 2017).

### Glaciares de escombros intactos (activos e inactivos)

En el caso de las geoformas pertenecientes al ambiente periglacial, una vez obtenida el área (A) de cada glaciar de escombros se procedió al cálculo de su espesor (H) teniendo en cuenta la ecuación empírica desarrollada por Barsh (1996) y modificada por Brenning (2005a), basada en relaciones geométricas entre el área y espesor:

$$H \text{ (m)} = 50 \times [\text{área}(\text{km}^2)]^{0,2}$$

### 2.3 Estimación de volumen de agua equivalente

#### Glaciares y glaciaretas

Para este cálculo, se utilizaron tres ecuaciones matemáticas diferentes propuestas por distintos autores. En la Tabla 1 se muestran las fórmulas con sus respectivos autores utilizadas en este trabajo.

Tabla 1. Ecuaciones matemáticas utilizadas y desarrollados por diferentes autores. La unidad de volumen obtenida es kilómetros cúbicos (km<sup>3</sup>). Donde A es el área y k el espesor.

Autor	Ecuación matemática	Comentario
Chen y Ohmura (1990)	$0.0285 \times A^{1.357}$	Basado en glaciares de Los Alpes
Bahr (1997)	$k \times A^{1.25}$	Exponentes justificados físicamente
Radic y Hock (2010)	$0.0538 \times A^{1.25}$	Basada en estudios recientes

#### Glaciares cubiertos

Los glaciares cubiertos por definición presentan una superficie cubierta por detritos de espesor variable. Algunos autores han diferenciado tres clases de glaciares cubiertos dependiendo del espesor de la cubierta detrítica (Janke et al., 2017) (Tabla 2).

Tabla 2. Clases de glaciares cubiertos según la cubierta detrítica y el porcentaje de hielo (Janke et al., 2017).

Tipo	Clase	Porcentaje de hielo (%)
Glaciar Cubierto	1	85 - 100
	2	65 - 85
	3	45 - 65

#### Glaciares de escombros activos e inactivos

En este trabajo se asume que el volumen de hielo estimado en glaciares de escombros activos es del 40–60% del volumen total (Barsch, 1996; Haeberli *et al.*, 1998; Arenson *et al.*, 2002; Hausmann *et al.*, 2007; Brenning, 2008; Krainer y Ribis, 2012), empleando de esta manera un límite inferior de 40%, un valor medio del 50% y un límite superior del 60% de hielo. En el caso de los glaciares de escombros inactivos se consideró una relación hielo/detrito teniendo en cuenta un porcentaje de 15% como límite inferior, un valor medio de 25% y un límite superior de 35%, de hielo, teniendo en cuenta trabajos previos. Estos porcentajes fueron elegidos de acuerdo con los antecedentes existentes para los Andes Centrales (Monnier y Kinnard, 2013).

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 *Inventario regional*

En la zona de estudio se han identificado en total 403 geoformas (Figura 3) de las cuales 171 corresponden al ambiente glacial y 232 al ambiente periglacial. Los glaciares (n=54) ocupan una superficie total de 58,6 km<sup>2</sup>, los glaciaretos (n=53) una superficie de 4,5 km<sup>2</sup> y los glaciares cubiertos (n=64) una superficie de 19 km<sup>2</sup> (Tabla 3). Los glaciares de escombros activos (n=128) ocupan una superficie de 38,8 km<sup>2</sup> y los glaciares de escombros inactivos (n=104) una superficie de 19,9 km<sup>2</sup> (Tabla 3).

Tabla 3. Tipo, cantidad y área de las geoformas del ambiente glacial y periglacial identificadas en el inventario utilizado.

Ambiente	Tipo de geoforma	Cantidad	Área (Km <sup>2</sup> )	Área por ambiente (km <sup>2</sup> )	Porcentaje ocupado (%)	Porcentaje por ambiente (%)
Glacial	Glaciar	54	58,6		2,81	
	Glaciarete	53	4,5	82,1	0,21	3,93
	Glaciar cubierto	64	19		0,91	
Periglacial	GEA	128	38,8	58,7	1,86	2,81
	GEI	104	19,9		0,95	

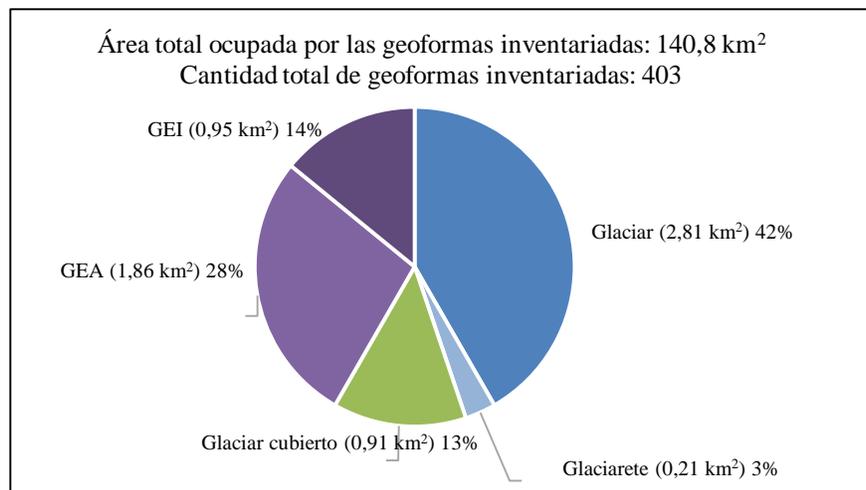


Figura 3. Área ocupada por las geoformas inventariadas.

#### 3.2 *Volumen de agua equivalente*

El cálculo del contenido de agua equivalente almacenada en los glaciares y glaciaretos arrojó un valor de 2,328 km<sup>3</sup> según la fórmula propuesta por Chen y Ohmura (1990), un valor de 3,937 km<sup>3</sup> teniendo en cuenta la relación establecida por Bahr (1997) y un valor de 3,049 km<sup>3</sup> de acuerdo con el cálculo propuesto por Radic y Hock (2010). En el caso de los glaciares cubiertos, el cálculo de agua equivalente arrojó un valor de 0,265 km<sup>3</sup> considerando un porcentaje de hielo del 45%, un valor de 0,383 km<sup>3</sup> considerando un 65% y un 0,501 km<sup>3</sup> según un porcentaje de 85% de hielo. Por otra parte, en el ambiente periglacial, el cálculo de volumen de agua equivalente para los glaciares de escombros activos (GEA) arrojó un resultado de 0,5957 Km<sup>3</sup> utilizando el 40% de hielo. Luego, empleando el 50% de hielo el volumen obtenido fue de 0,7446 Km<sup>3</sup>. Y, por último,

utilizando el límite superior de 60% de contenido de hielo el volumen de agua equivalente obtenido fue de 0,8935 Km<sup>3</sup>. En el caso de los glaciares de escombros inactivos (GEI) se obtuvo un valor de 0,1062 km<sup>3</sup> para el límite inferior cuyo porcentaje de hielo empleado fue 15%. Cuando se utilizó el 25% de hielo el cálculo de agua equivalente el resultado obtenido fue de 0,1771 Km<sup>3</sup>. Y en el último caso considerando el 35 % de hielo se obtuvo un volumen de 0,2456 Km<sup>3</sup>.

#### 4 CONCLUSIONES

Los resultados del presente trabajo constituyen una aproximación de medidas de espesor y volumen de agua equivalente del ambiente glacial y periglacial basada en fórmulas matemáticas utilizadas en otros glaciares de los Andes. Los valores obtenidos sirven como valores de referencia para comparar con otros sectores de los Andes Centrales y como base para comparar en el futuro teniendo en cuenta posibles cambios climáticos. Se recomienda para una estimación con mayor precisión de volumen de las distintas geoformas del ambiente glacial y periglacial iniciar trabajos de detalle que abarquen estudios geofísicos, perforaciones y de monitoreo climático.

#### 5 AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de San Juan por permitir llevar a cabo este trabajo en el marco del proyecto CICITCA 2018/2019 - Código 21/E1115.

#### 6 REFERENCIAS

- Ahumada, A. L. 2008. Geoindicadores criosféricos en los Andes Centrales del NW de Argentina. *Acta geológica lilloana*, 20(1), 9-17.
- Azócar y Brenning, 2010. Hydrological and geomorphological significance of rock glaciers in the dry Andes, Chile (27 –33 S). *Permafrost Periglac Process*. doi:10.1002/pp.669.
- Bahr, D.B., Meier, M.F., Peckham, S.D., 1997. The physical basis of glacier volume-area scaling. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 102 (B9), 20355–20362.
- Barsch, D. 1996. *Rock glaciers. Indicators for the present and former geo-ecology in high mountain environment*. Springer-Verlag, 331 pp. Heidelberg, Germany.
- Brenning A. 2005a. Climatic and geomorphological controls of rock glaciers in the Andes of Central Chile: combining statistical modelling and field mapping. Ph.D. Dissertation, HumboldtUniversita"t zu Berlin. Electronic Publication, kobv:11-10049648.
- Chen J. & Ohmura A. 1990. Estimation of Alpine glacier water resources and their change since the 1870s. In *Hydrology in Mountainous Regions, I – Hydrological Measurements; the Water Cycle*, Proceedings of two Lausanne Symposia, August 1990, Lang H, Musy A (eds). IAHS Press: Wallingford, Oxfordshire, UK 193: 127–135.
- Forte, A. P., Villarroel C. y Tamburini Beliveau G. 2017a. Ambiente Glacial y Periglacial en el Cordón de La Ramada, Andes Centrales, Argentina. XX Congreso Geológico Argentino - Geología: Presente y Futuro. Tucumán, Argentina.
- Haeberli, W., & Beniston, M. 1998. Climate change and its impacts on glaciers and permafrost in the Alps. *Ambio*, 27(4), 258-265.
- Janke, J. R., Ng, S. & Bellisario, A. 2017. An inventory and estimate of water stored in firn fields, glaciers, debris-covered glaciers, and rock glaciers in the Aconcagua River Basin, Chile. *Geomorphology*. 296, 142–152.
- Perucca, L.P. y Esper Angillieri, M.Y. 2011. Glaciers and rock glacier's distribution at 28° SL, Dry Andes of Argentina, and some considerations about their hydrological significance. *Environmental Earth Science*, 64: 2079-2089.
- Radic, V. & Hock, R., 2010. Regional and global volumes of glaciers derived from statistical upscaling of glacier inventory data, *J. Geophys. Res.*, 115, F01010.