

DOI: 10.24850/j-tyca-2025-06-01

Artículos

**La contribución hídrica del glaciar y la dinámica de los procesos glaciológicos-hidrológicos de la cuenca. Caso Yanamarey, Cordillera Blanca, Perú**

**The water contribution of the glacier and the dynamics of glaciological-hydrological processes in the basin. Yanamarey, Cordillera Blanca, Perú case**

Arnaldo Tacsi-Palacios<sup>1</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4125-6155>

Abel Mejía<sup>2</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9070-3898>

Thomas Condom<sup>3</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4408-8580>

María Cardenas-Gaudry<sup>4</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1053-8456>

<sup>1</sup>Seguimiento al Comportamiento de Glaciares y Lagunas, Autoridad Nacional del Agua / Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), Programa de Doctorado en Recursos Hídricos, Lima, Perú, [atacsi@ana.gob.pe](mailto:atacsi@ana.gob.pe)

<sup>2</sup>Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), Programa de Doctorado en Recursos Hídricos, Lima, Perú, [jabel@lamolina.edu.pe](mailto:jabel@lamolina.edu.pe)

<sup>3</sup>Université Grenoble Alpes-IRD-CNRS-INRAe-Grenoble INP, Institut des Geosciences de l'Environnement (IGE), UMR 5001, Grenoble, Francia, [Thomas.condom@ird.fr](mailto:Thomas.condom@ird.fr)



<sup>4</sup>Universidad Científica del Sur, Lima, Perú,  
mcardenasga@cientifica.edu.pe

Autor para correspondencia: Arnaldo Tacsí-Palacios, atacsi@ana.gob.pe

## Resumen

La cuenca con presencia glaciar en los Andes tropicales presenta continuo derretimiento, como efecto del cambio climático, lo que influencia en la generación de escorrentía y en los procesos hidrológicos. El estudio se realizó entre los años 2013 y 2020 en la microcuenca Yanamarey (Cordillera Blanca, Perú), utilizando las imágenes de satélite y modelización hidro-glaciológica, aplicando los modelos semidistribuidos GSM y SOCONT, para estimar procesos glaciológicos e hidrológicos distribuidos por bandas de altitud. En este periodo, en el glaciar se determinaron en promedio 0.27 km<sup>2</sup> de superficie y 1.65 hm<sup>3</sup> de volumen; la contribución hídrica promedio en la microcuenca es de 93 l/s, distribuidos de la siguiente forma: 8 % de hielo, un 15 % de nieve, un 27 % de agua subterránea y un 50 % de precipitación (directa). Además, los caudales de hielo y nieve presentan una tendencia negativa anual de 0.5 y 0.7 l/año, respectivamente. Produciendo al final de siete años en: a) proceso glaciológico, la fusión de hielo de 14 m debajo de la altitud de 4 800 msnm, la acumulación de nieve de 12.7 m encima de la altitud de 5 000 msnm; b) proceso hidrológico (zona no glaciar), en suelo limpio, el agua acumulada se infiltra de 118 m (0.19 cm/h) y agua superficial acumulada de 34 m (0.06 cm/h). Los valores estimados de la contribución hídrica y la variación de disponibilidad anual de la masa glaciar por altitudes dan una idea de los procesos hídricos que ocurren en cabecera

de cuenca y de la importancia de sus efectos para la vida útil de los glaciares.

**Palabras clave:** Cordillera Blanca, glaciar Yanamarey, modelización hidro-glaciológica, GSM, SOCONT, procesos hídricos.

## Abstract

The watershed with glacier presence in the Tropical Andes presents continuous melting, as an effect of climate change, which influencing runoff generation and hydrological processes. The study was conducted between 2013 and 2020 in the Yanamarey micro-watershed (Cordillera Blanca, Peru), using satellite images and hydro-glaciological modeling, applying the semi-distributed models GSM and SOCONT, to estimate glaciological and hydrological processes distributed by altitude bands. During this period, an average of 0.27 km<sup>2</sup> of surface area and 1.65 hm<sup>3</sup> of volume were determined in the glacier; the average water contribution in the micro-basin is 93 l/s, distributed as follows: 8 % ice, 15 % snow, 27 % groundwater and 50 % precipitation (direct). In addition, the ice and snow flows show a negative annual trend of 0.5 and 0.7 l/year, respectively. Producing at the end of seven years in: a) glaciological process, ice melt of 14 m below the altitude of 4 800 masl, snow accumulation of 12.7 m above the altitude of 5 000 masl; b) hydrological process (non-glacial zone), in clean soil, accumulated water infiltrates of 118 m (0.19 cm/h) and accumulated surface water 34 m (0.06 cm/h). The estimated values of the water contribution and the variation of annual availability of the glacier mass by altitude give us an idea of the water processes that occur at the headwaters of the basin and the importance of their effects on the lifespan of the glaciers.

**Keywords:** Cordillera Blanca, Yanamarey glacier, hydro-glaciological modeling, GSM, SOCONT, water processes.

Recibido: 25/01/2024

Aceptado: 05/09/2024

Publicado *ahead of print*: 19/09/2024

Versión final: 01/11/2025

## Introducción

En Perú, los glaciares tropicales están produciendo un aporte hídrico importante a la cuenca, especialmente en época seca (Baraer *et al.*, 2012), pues muchas comunidades utilizan los aportes de los glaciares de la Cordillera Blanca. Sin embargo, en 58 años, esta cordillera presenta una reducción en 44 % de volumen glaciar y el glaciar de Yanamarey alcanza el 90 % de volumen (AEGL & ANA, 2020). Estos cambios de cobertura de glaciares en la cuenca influyen en la hidrología (Ramírez 2008; López-Moreno *et al.*, 2017) debido a que están reduciendo el aporte del glaciar a los caudales del río (Baraer *et al.*, 2012).

El proceso de formación de los glaciares por la presencia de nieve está sujeto sobre todo a la precipitación y temperatura, por lo que juegan un rol importante en el cambio dinámico en las dimensiones físicas de los glaciares. Así, la reducción del glaciar a través del derretimiento de hielo y nieve podría tener implicancias en la hidrología (Ramírez, 2008) que se utiliza actualmente en 11 regiones para uso doméstico, agropecuario, energético y minero (AEGL & ANA, 2021b). Las limitantes en zonas de montaña son la disponibilidad y calidad de datos meteorológicos,

hidrológicos y glaciológicos, lo que obstaculiza el desarrollo de un sistema de pronósticos continuo de caudales diarios (Bennett, Robertson, Ward, Hapuarachchi, & Wang, 2016). Sin embargo, se ha evaluado el mínimo de años para establecer modelos eficientes de precipitación-escorrentía (con glaciares), que sugiere que un periodo de calibración de cinco años a una escala temporal diaria captura la mayor parte de la variabilidad hidrológica, por lo que este sería el mínimo de años para lograr un rendimiento razonable del modelo predictivo (Bennett *et al.*, 2016; Merz, Parajka, & Blo, 2009). Por lo tanto, para la presente investigación se recopilaron, evaluaron y validaron registros para el periodo 2013-2020 (siete años), y que fueron ingresados como variables en la modelización hidro-glaciológica.

El modelo hidro-glaciológico que evalúa la cuenca (áreas glaciares y no glaciares) ha utilizado con éxito el modelo grado-día (Condom *et al.*, 2012; Muñoz, Huggel, Drenkhan, Vis, & Viviroli, 2021) para simular la contribución del agua de la fusión glaciar en altas montañas, con una reducción constante de tamaño inducida por el clima (Khadka, Kayastha, & Kayastha, 2020) para proyectar el cambio de masa glaciar. Por esto, los glaciares tropicales, como la Cordillera Blanca, requieren de un estudio detallado orientado a la hidro-glaciología para conocer el comportamiento de la escorrentía y la influencia de los aportes de agua por fusión de hielo y fusión de nieve.

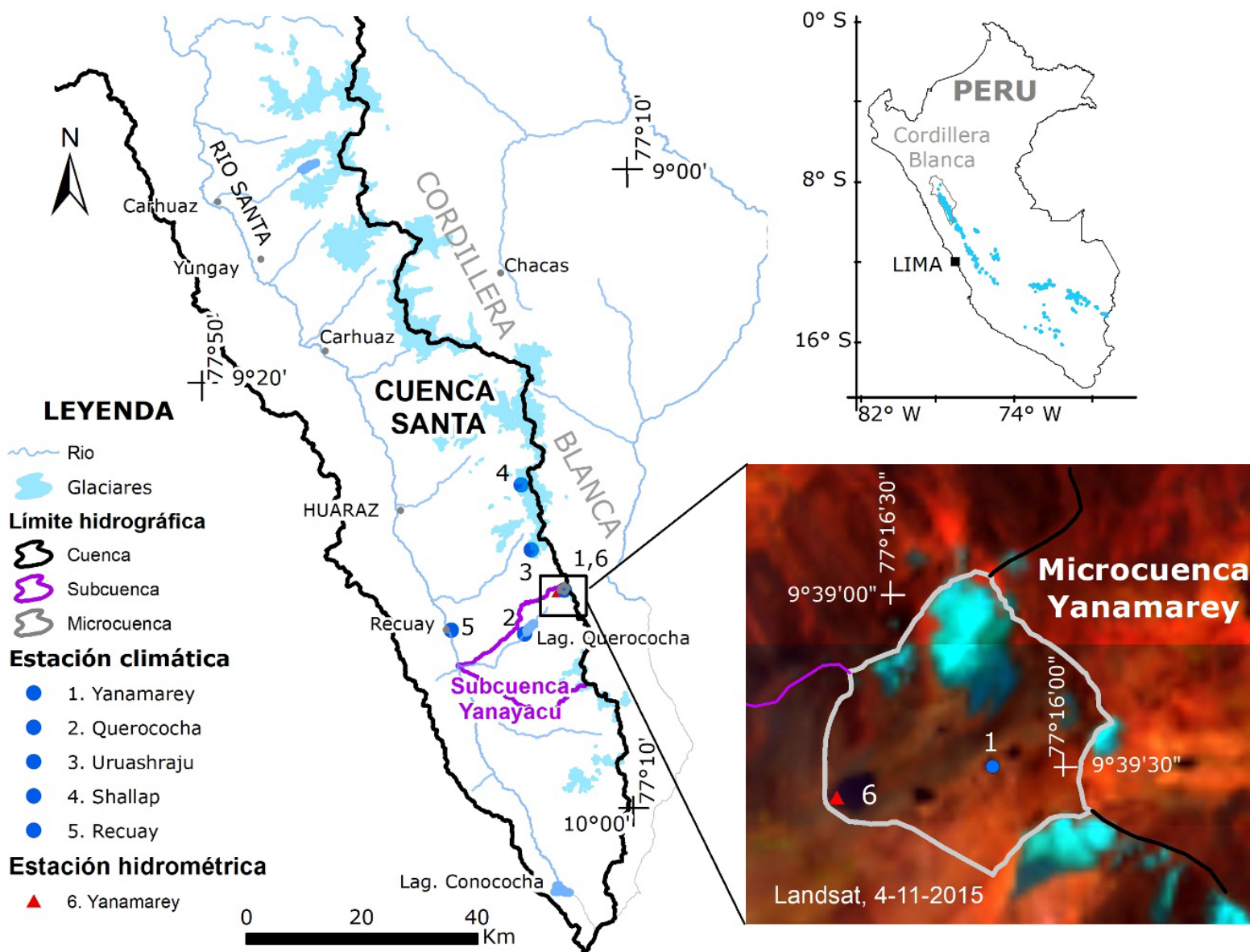
En este contexto, el objetivo del artículo es evaluar el comportamiento de los caudales, parámetros físicos y procesos hídricos en la cuenca (zona glaciar y no glaciar) de la microcuenca Yanamarey ubicada en la Cordillera Blanca, para los años 2013 a 2020, mediante el modelo hidro-glaciológico, utilizando la temperatura y la precipitación como principales variables. Por lo tanto, las estimaciones de la

disponibilidad de la escorrentía producidas en la microcuenca servirán para informar a la población rural y urbana, a fin de que tomen decisiones oportunas en la planificación y gestión integrada de recursos hídricos (GIRH).

## Materiales y métodos

### Área de estudio

La microcuenca de Yanamarey, situada a 4 750 msnm (9° 39.4' S, 77° 16.2' W) al sur de la Cordillera Blanca y al noroeste de Perú (Figura 1) es parte de la subcuenca Yanayacu, cuyas aguas llegan a la laguna Querococha y al río Yanayacu, que desemboca en el río Santa, al sur de la ciudad de Recuay.



Esta microcuenca (glaciar y no glaciar) abarca un área de 1.55 km<sup>2</sup> y comprende una altitud que va de 4 620 a 5 200 msnm, mientras que el glaciar Yanamarey tiene una superficie de 0.22 km<sup>2</sup>, según la imagen satelital de 2019, que abarca desde 4 777 msnm hasta 5 150 msnm.

Comparado con la superficie del año 1970, ha perdido 1.12 km<sup>2</sup> (Hidrandina, 1989) y el retiro de frente glaciar de 1948 a 2018 es de 974 m (AEGL & ANA, 2019). La microcuenca presenta temperaturas que varían de -0.5 a 6.5 °C en la estación seca y de -1.1 a 5.6 °C en la estación húmeda; la precipitación media anual está entre 1 500 y 2 100 mm/año (AEGL & ANA, 2018).

## Selección de información para la identificación del glaciar

Para evaluar los cambios temporales de glaciares se utilizaron las imágenes de satélite Landsat y Sentinel en periodos secos, obtenidas de la página web (Tabla 1); para determinar la morfometría se usó modelo de elevación digital (o DEM) denominado TanDEM-X del año 2016 con resolución 10 m, que es la misión alemana de observación de la Tierra con radar banda X, proporcionada por Seehaus *et al.* (2019).

**Tabla 1.** Características en las imágenes satelitales utilizada para la identificación de glaciares.

Satélite	Resolución espacial (m)	Fecha	Formato
Landsat 7 ETM+	30	14/07/12	GeoTIFF
Landsat 7 ETM+	30	03/09/13	GeoTIFF
Landsat 7 ETM+	30	21/08/14	GeoTIFF
Landsat 7 ETM+	30	24/08/15	GeoTIFF
Landsat 7 ETM+	30	26/08/16	GeoTIFF
Landsat 7 ETM+	30	28/07/17	GeoTIFF
Landsat 8 OLI	30	09/09/18	GeoTIFF
Sentinel-2A	10	02/08/19	GeoTIFF
Sentinel-2A	10	06/08/20	GeoTIFF



Para la evaluación del comportamiento hídrico se recopilaron datos hidro-climáticos diarios de la oficina de Seguimiento al Comportamiento de Glaciares y Lagunas (SCGL) de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (Senamhi) (Tabla 1 y Mapa 1).

## Determinación de parámetros físicos del glaciar en microcuena

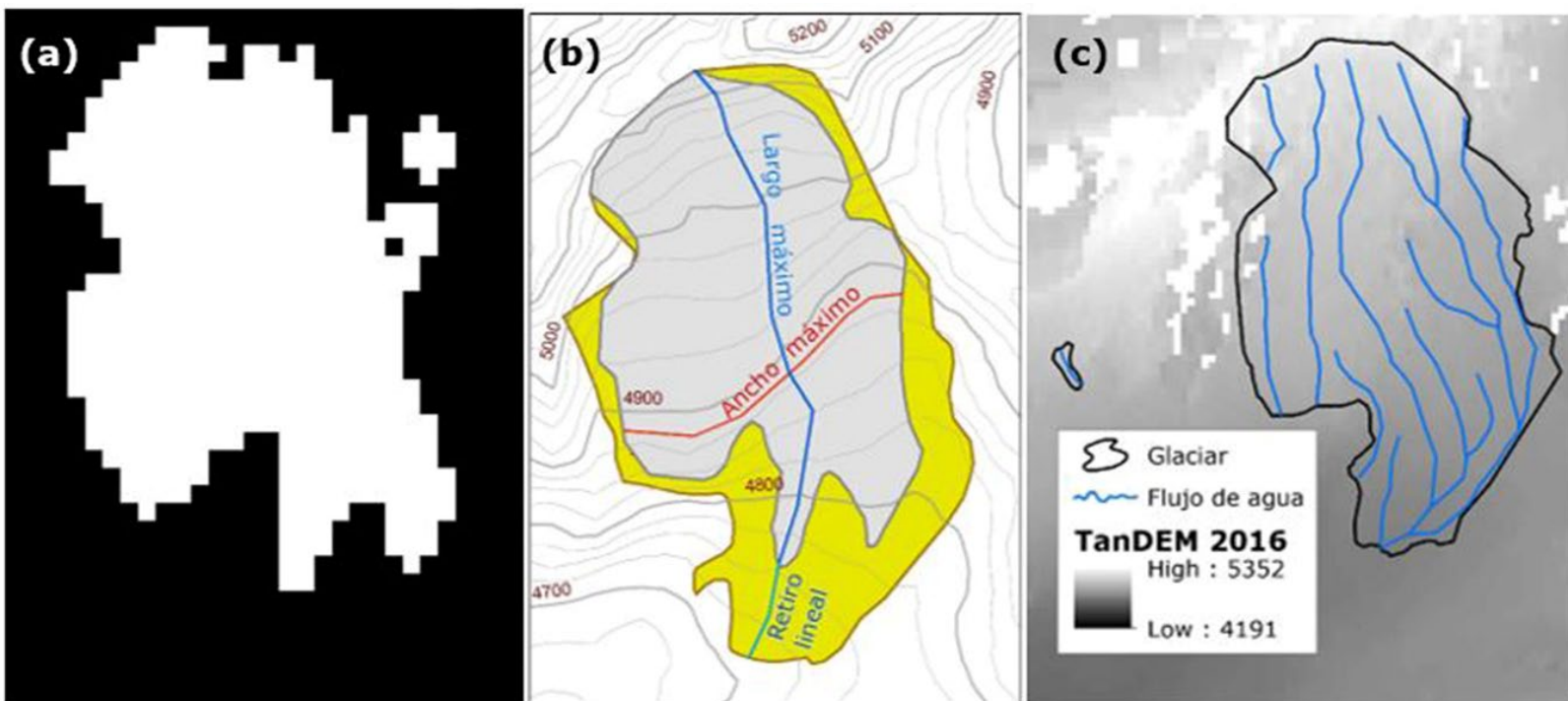
En la dimensión espacial del glaciar se utilizaron plataformas computacionales para determinar la superficie, longitudes y volumen, la cual es plasmada en mapas cartográficos.

**Superficie.** La identificación del glaciar en la imagen satelital (Tabla 1) está basada en el método de Índice Normalizado Diferencial de la Nieve (NDSI, por sus siglas en inglés) (Dozier, 1989; Hall & Riggs, 2011) aplicado con éxito en la Cordillera Blanca (Silverio & Jaquet, 2005; Racoviteanu, Arnaud, Williams, & Ordon, 2008). Una vez calculado el NDSI, se eligió un umbral mayor a 0.6 para discriminar el hielo limpio del área circundante, considerado óptimo (Racoviteanu *et al.*, 2008). Las imágenes de alta resolución SAS Planet y Google Earth facilitaron la validación de la delimitación y discriminación de la nieve estacional (Guo *et al.*, 2015; Bomshoms-Calvelo, Quispe-Gutiérrez, & Quispe-Vega, 2018). Una vez delimitado el glaciar, se determinó la superficie del glaciar de manera automática en la plataforma ArcMap de ArcGis.

**Longitud.** Se determinaron manualmente las líneas (largo, ancho y retroceso) en el relieve topográfico del TanDEM-X. El largo máximo es la línea que sigue el flujo de agua desde la cumbre más alta hasta el punto más bajo y el ancho máximo es la línea paralela a la curva de nivel,

considerando los extremos más anchos del glaciar (Müller, Caflisch, & Müller, 1977). En tanto, el retroceso del glaciar representa el flujo de agua entre el punto de drenaje del glaciar inicial y el actual, y representa la distancia de pérdida horizontal (Taksi, Condom, Cochachin, & Montalvo, 2022).

**Volumen.** Para determinar el volumen del glaciar se utilizó el modelo matemático Glacier Bed Topography (GlabTop) desarrollado por Linsbauer, Paul y Haeberli (2012), bajo la metodología de Haeberli y Hoelzle (1995), que requiere dato de entrada del contorno glaciar, TanDEM-X de 2016 (Seehaus *et al.*, 2019) y las líneas de escurrimiento de agua sobre el glaciar (Figura 2-a). La información ingresada al GlabTop.tbx se procesa en la plataforma de ArcGIS. El volumen sólido de hielo multiplicado con la densidad ( $0.9 \text{ g/cm}^3$ ) permite obtener el volumen de agua equivalente.



**Figura 2.** Procesos de estimación de geometría glaciar: a) superficie glaciar (color blanco) según NDSI; b) trazo de longitud de largo máximo, ancho máximo y retiro lineal, y c) datos de entrada en estimación de volumen: red de flujo de agua (color azul), contorno glaciar (color negro) y modelo digital de elevación TanDEM-X.

## Estimación hidro-climática de datos faltantes diarios

La serie de datos de precipitación y temperatura es discontinua en varios periodos en la estación Yanamarey y los registros faltantes se completaron con cuatro estaciones circundantes al área de estudio, mientras los datos de caudales son continuos en la estación hidrométrica de Yanamarey (Tabla 2). En la serie de datos se hizo un control de calidad y se retiraron algunos valores incongruentes.

**Tabla 2.** Coordenadas de las estaciones hidro-climáticas.

Núm.	Nombre	Latitud sur	Longitud oeste	Altitud (msnm)	Tipo de estación	Fuente
1	Yanamarey	9° 39.5'	77° 16.2'	4 698	Climática	SCGL-ANA
2	Querococha	9° 43.6'	77° 20.0'	4 012	Climática	SCGL-ANA
3	Uruashraju	9° 35.7'	77° 19.3'	4 693	Climática	SCGL-ANA
4	Shallap	9° 29.6'	77° 20.2'	4 965	Climática	SCGL-ANA
5	Recuay	9° 43.2'	77° 26.9'	3 411	Climática	Senamhi
6	Yanamarey	9° 39.6'	77° 16.6'	4 620	Hidrométrica	SCGL-ANA

**Precipitación.** Se determinó mediante el método de la razón (Alfaro & Pacheco, 2000; Medina, 2008; Ilbay, Fonseca, Quichimbo, & Lara, 2017), que considera estación A (datos completos) y estación B (datos incompletos) (Ecuación (1)):

$$b_j = \left( \frac{\sum_{i=1}^N b_i}{\sum_{i=1}^N a_i} \right) a_j \quad (1)$$

Donde:

$b_j$  = precipitación estimada de la estación B (mm/d) para el día faltante  $j$

$b_i$  = registro precipitación de la estación B (mm/d)

$a_i$  = registro de precipitación de la estación A (mm/d)

$N$  = cantidad de datos disponible de cada estación

**Temperatura.** Para determinar los valores de temperatura faltantes para la estación de Yanamarey se utilizó un gradiente térmico

de 0.8 °C/100 m, estimado por Carey, Huggel, Bury, Portocarrero y Haeberli (2012) para la Cordillera Blanca, en estaciones ubicadas a altitudes superiores a 3 400 msnm.

Los datos reconstruidos de clima y caudal para el periodo 2013-2020 se utilizarán como registros de entrada en la modelización hidroglaciológica.

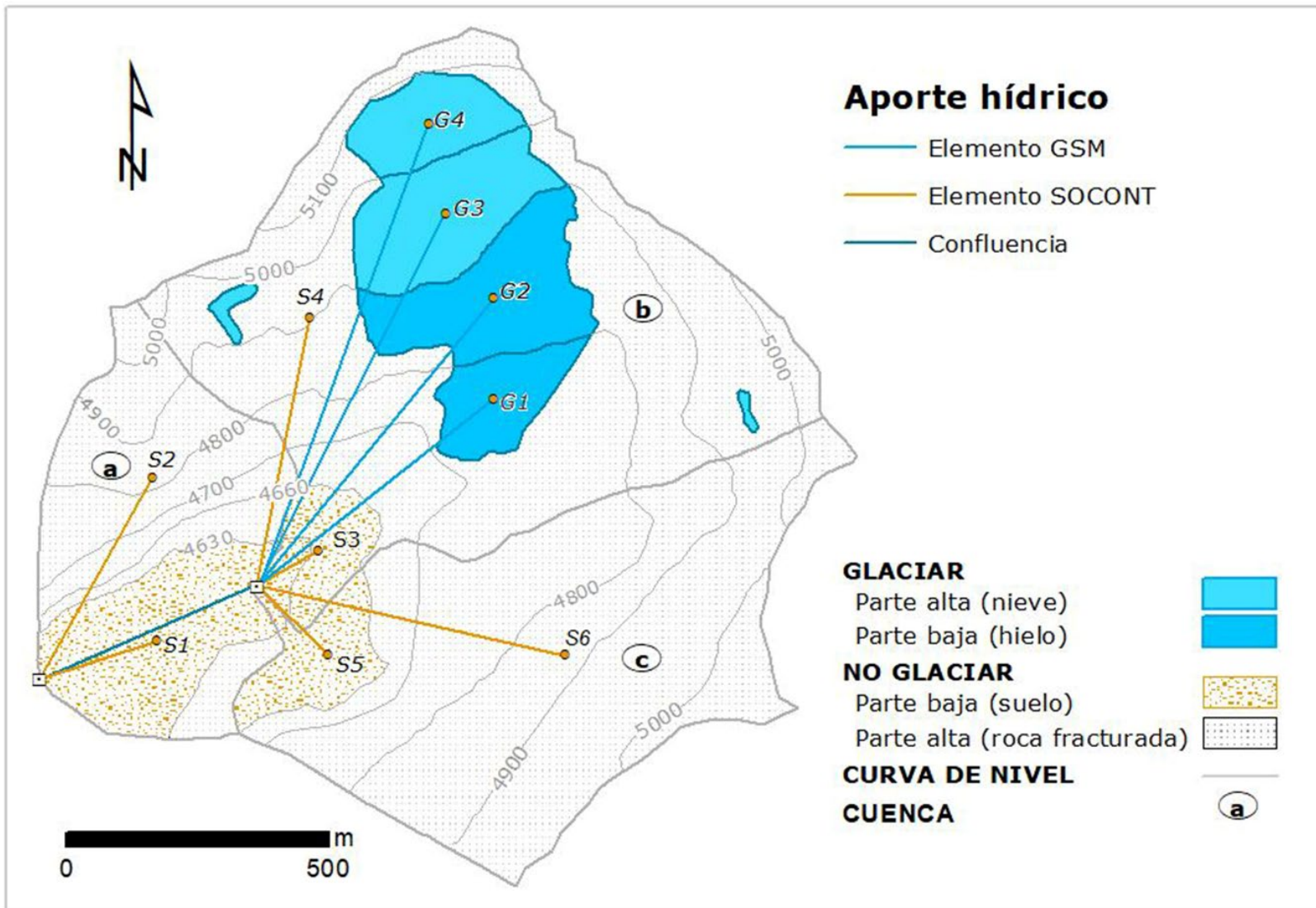
## **Funcionamiento del modelo hidro-glaciológico: GSM y SOCONT**

### **Planteamiento**

El modelo GSM y SOCONT se empleó en el programa hidrológico e hidráulico RS MINERVE, que simula la montaña morfológicamente compleja con presencia de hielo y nieve (García, Paredes, Foehn, Roquier, & Fluixa, 2019). Los procesos de lluvia-escorrentía son simulados en modo conceptual semidistribuido para cuantificar los caudales de fusión de hielo ( $Q_{hielo}$ ), caudal de fusión de nieve ( $Q_{nieve}$ ), intensidad infiltrada por lluvia y nieve derretida ( $Q_{subterráneo}$ ) e intensidad neta de escorrentía superficial por la lluvia ( $Q_{directo}$ ).

El planteamiento en modo semidistribuido se definió en tres cuencas (a, b, c) con bandas de altitud. Del centroide de cada banda considerada se han asociado los elementos de los modelos hidrológicos GSM (zona glaciar) y SOCONT (zona no glaciar), que recogen la contribución de los diferentes tipos de escorrentía en su punto de aforo o medición (García *et al.*, 2019). El rango de banda de altitud define el relieve topográfico como parte alta y baja en cada cobertura predominante. En la zona glaciar se establecieron dos bandas (G3 y G4) ubicadas en la parte alta de cobertura

de nieve y dos bandas (G1 y G2) en la parte baja de cubierta de hielo, dividida en la cota 4 900 msnm, que representa la línea de altitud de equilibrio (ELA) referencial para el año 2016 (AEGL & ANA, 2018). En la zona no glaciar se han creado 06 elementos, tres de ellos se ubicaron en la parte baja (S1, S3, S5) con cobertura de suelo limpio de pendiente moderada (8-25%), y los otros tres en la parte alta (S2, S4, S6), con presencia de roca fracturada de pendiente empinada (de 50 a 75 %) (Figura 3).



**Figura 3.** Esquema del funcionamiento del modelo hidro-glaciológico en la cuenca por banda de altitud. Fuente: Tacsí, Condom, García, Cochachin y Mejía (2021).

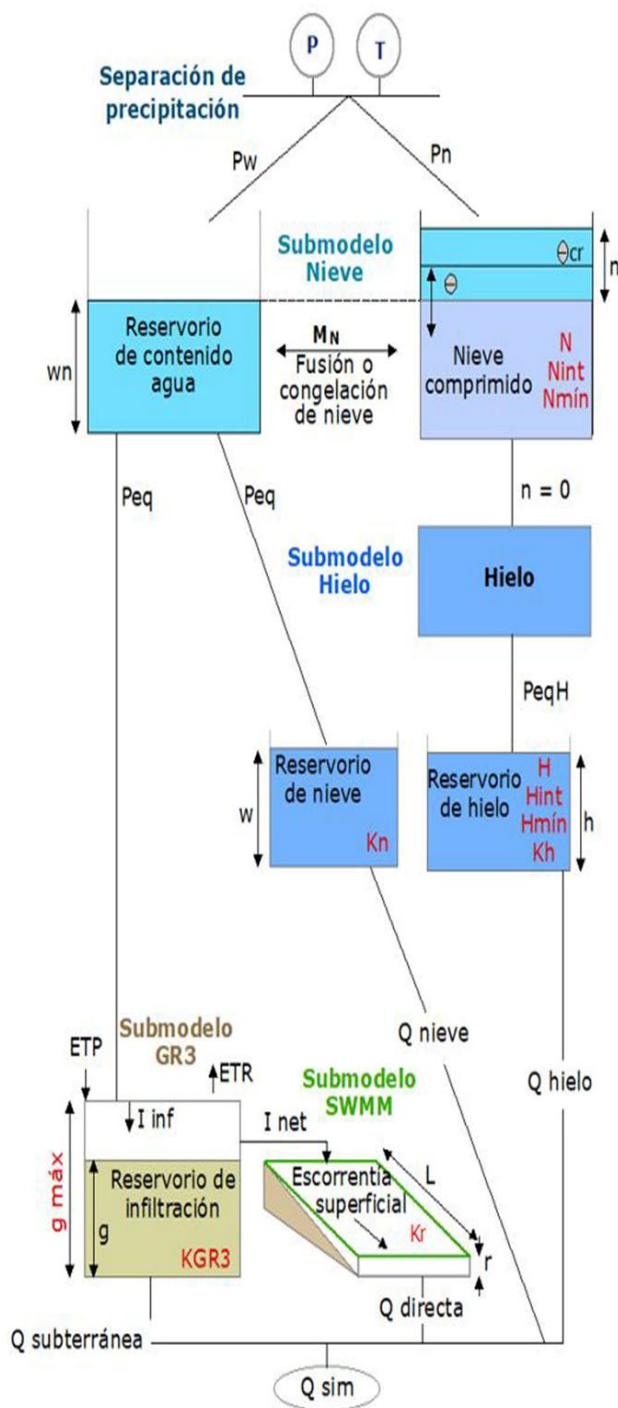
### Evaluación de variables y parámetros del modelo

La simulación hidro-glaciológica de la microcuenca glaciar está basada en los esquemas conceptuales de los modelos hidrológicos GSM y SOCONT,

la identificación de las variables de ingreso y de salida, y los parámetros de calibración.

En el esquema conceptual (Figura 4), el modelo GSM está constituido por submodelos nieve y tres submodelos hielo; el modelo SOCONT consta de dos submodelos nieve, un submodelo GR3 y un submodelo SWMM (Storm Water Management Model) (García *et al.*, 2019). Los dos modelos inician con submodelo de nieve alimentado por precipitación sólida ( $P_n$ ) y precipitación líquida ( $P_w$ ), en función de la temperatura ( $T$ ). La precipitación sólida es la entrada a la nieve compacta y varía su contenido en función del factor de fusión o la acumulación de nieve ( $N$ ). La precipitación líquida con el ingreso de fusión de nieve ( $M_N$ ) produce la precipitación equivalente ( $P_{eq}$ ) almacenada en el reservorio de contenido en agua. El modelo GSM, que consta de submodelo de hielo, recibe datos de submodelo de nieve: a) precipitación equivalente ( $P_{eq}$ ) al reservorio de nieve que produce caudal de nieve ( $Q_{nieve}$ ); b) cuando la altura de la nieve es cero genera el flujo de hielo equivalente ( $P_{eqH}$ ) hacia al reservorio de hielo lo que drena de la cuenca ( $Q_{hielo}$ ) (García *et al.*, 2019). En tanto, en el modelo SOCONT, el  $P_{eq}$  producido en submodelo de nieve es el dato de entrada al submodelo GR3, que calcula la intensidad de infiltración ( $I_{inf}$ ), la evapotranspiración potencial (ETP) con el método de Oudin (2005), la intensidad neta ( $I_{net}$ ) y el caudal subterráneo. La intensidad neta actual en el submodelo superficial (SWMM) genera el de escurrimiento directo ( $Q_{directo}$ ) considerando el coeficiente Strickler ( $K_r$ ) (García *et al.*, 2019). Los dos modelos requieren la extensión de la superficie del glaciar como variable de entrada en el periodo de simulación y la estimación de los parámetros ( $N$ ,  $H$ ,  $T_{cp2}$  y otros).





### Variables de simulación

- P: Precipitación (mm/d)
- T: Temperatura (°C)
- Pw: Precipitación líquida (mm/d)
- Pn: Precipitación sólida (mm/d)
- Peq: Precipitación equivalente (mm/d)
- PeqH: Precipitación equivalente de hielo (mm/d)
- n, w, h: Altura de nieve y hielo (m)
- r: Altura de agua (m)
- wn: Altura de contenido de agua (m)
- Θ: Contenido de agua en la nieve acumulada
- Θcr: Contenido crítico de agua en la nieve acumulada
- g: Nivel de agua en el reservorio de infiltración (m)
- ETP, ETR: Evapotranspiración potencial y real (mm/d)
- I inf: Intensidad de infiltración (mm/d)
- I net: Intensidad neta (mm/d)
- L: Longitud de plano (m)
- Q hielo: Caudal de hielo (m<sup>3</sup>/s)
- Q nieve: Caudal de nieve (m<sup>3</sup>/s)
- Q subterránea: Caudal de GR3 (m<sup>3</sup>/s)
- Q directa: Caudal de SWMM (m<sup>3</sup>/s)
- Q sim: Caudal total (m<sup>3</sup>/s)

### Parámetros de calibración

- N, H: Coeficiente de fusión de nieve y hielo (mm/°C/d)
- N int, H int: Coef. de intervalo de fusión de nieve y hielo (mm/°C/d)
- N mín, H mín: Coef. mínimo de fusión de nieve y hielo (mm/°C/d)
- Tcp1: Temperatura crítica mínima para precipitación líquida (°C)
- Tcp2: Temperatura crítica mínima para precipitación sólida (°C)
- Tcf: Temperatura crítica de fusión de nieve (°C)
- Kn: Coef. De liberación de fusión de nieve (1/d)
- Kh: Coef. De liberación de fusión de hielo (1/d)
- g máx: Altura máxima de infiltración (m)
- K GR3: Coeficiente de liberación de infiltración (1/s)
- Kr: Coeficiente de Strickler (m<sup>1/3</sup>/s)

**Figura 4.** Esquema conceptual de GSM y SOCONT. Fuente: adecuado del manual técnico de RS MINERVE de García *et al.* (2019) y Tacsí *et al.* (2021).

## Calibración y validación de modelos GSM y SOCONT

La simulación hidro-glaciológica se realiza en un periodo de siete años, donde los cambios de geometría del perímetro del glaciar son bastante pequeños, aunque esta suposición es una simplificación de la compleja dinámica glaciar (Schaepli, Hingray, Niggli, & Musy, 2005).

Para la calibración y validación del modelo se han sugerido (Marek *et al.*, 2016; Bodian, Dezetter, Deme, Djaman, & Diop, 2018) las siguientes alternativas de selección de periodos: 1) dividir los registros en dos partes iguales, o 2) dividir los registros en 2/3 partes para la calibración y 1/3 para la validación. En esta investigación se seleccionó el primer método, considerando dos periodos; es decir, el periodo de calibración (de agosto de 2013 a agosto de 2016) y el periodo de validación (de septiembre de 2016 a agosto de 2020).

La simulación de los modelos GSM y SOCONT se hizo mediante la calibración automática, que implica el cálculo de la predicción de error con procedimiento automático de optimización para buscar valores de parámetros que optimizan el valor de la función objetivo (FO) (García *et al.*, 2019). En la función objetivo (FO) se priorizaron los cuatro indicadores con pesos ponderados que maximizan a los indicadores Nash (NSE), Nash-In (NSE-LN) y Pearson (PCC), y minimizan al error pico normalizado (NPE), lo que se muestra en la Ecuación (2):

$$FO = 0.4 NSE + 0.2 NSE - LN + 0.2 PCC + 0.2 NPE \quad (2)$$

Donde:

$FO$  = función objetivo

0.4, 0.2, 0.2, 0.2 = pesos asignados

NSE, NSE-LN, PCC, NPE = indicadores estadísticos de medidas de bondad de ajuste

Los dos modelos se calibraron con el algoritmo del método Shuffled Complex Evolution-University of Arizona (SCE-UA) (Duan, Sorooshian, & Gupta, 1994; García *et al.*, 2019), que optimiza una función objetivo con sucesivas combinaciones de parámetros y que convergen en una solución.

## Resultados

### Parámetros físicos del glaciar Yanamarey

Las características físicas estimadas de la imagen satelital con técnicas geo-informáticas (Paul *et al.*, 2009) corresponden a longitud, superficie y volumen.

**Longitud horizontal.** Desde 2013, las dimensiones de longitud en el glaciar han cambiado de tamaño. Las medidas (largo máximo, ancho máximo) se han reducido a un ritmo de 26 m/año y 11.6 m/año, respectivamente; mientras, el retroceso lineal aumenta anualmente a 22.5 m/año. Así, en 2020, se tiene un largo de 728 m, ancho de 466 m y retroceso lineal de 155 m (Figura 5-c).

**Superficie.** La delimitación del glaciar y la tendencia de superficie en la microcuenca Yanamarey obtenida de las imágenes de Landsat y Sentinel del periodo 2013-2020 se visualizan en las Figuras 5<sup>a</sup> y 5d. En el mapa se aprecian los cambios de tamaño de masa de hielo (reducción)

y el área no glaciada de la microcuenca (incremento) a razón de 18 108 m<sup>2</sup>/año en ambos. Además, la tendencia decreciente del glaciar continuo es estimable para los años futuros con la Ecuación (3), pero los valores reales de tamaño pueden aproximarse con la hidro-glaciología según el escenario de clima futuro (Tacsí *et al.*, 2021):

$$Y = -18\,108x + 36\,777\,794 \quad (3)$$

Donde:

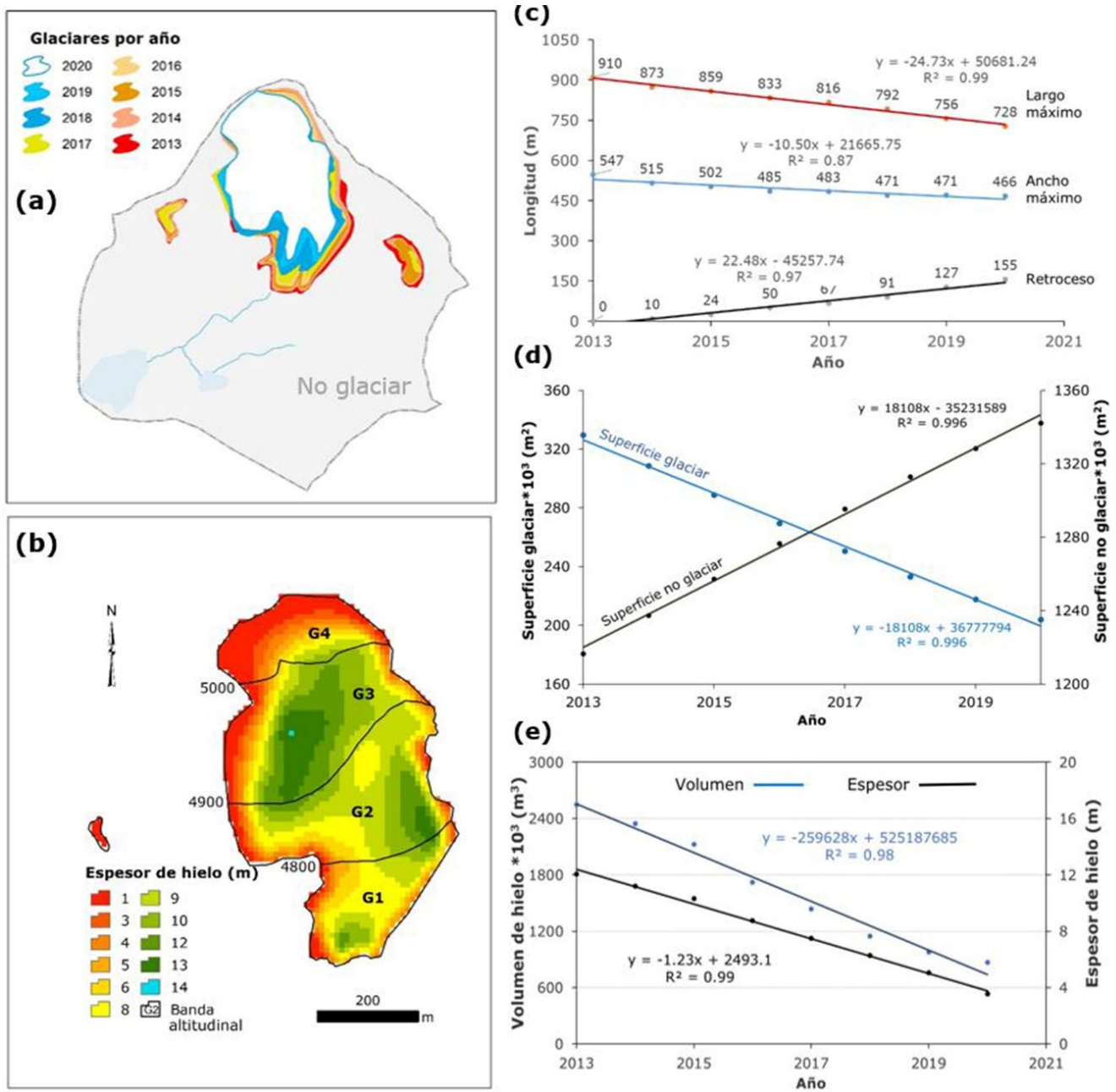
Y = superficie glaciada (m<sup>2</sup>)

X = tiempo (años)

**Volumen.** El volumen sólido del glaciar estimado corresponde a lo siguiente:

1. Glaciar del año 2016 (Figura 5-b), que calculado con el modelo matemático GlabTop es de 1 723 434 m<sup>3</sup> y espesor promedio de 8.8 m, donde las bandas G3 y G2 superan en 630 000 m<sup>3</sup> de volumen y 10 m de espesor; a la vez, en el mapa se observan las mayores alturas de espesor (14, 13 y 12 m) en las bandas 3, 2 y 1, respectivamente.

2. Volumen de glaciares de los años subsiguientes (Figura 5e). Se utilizaron los valores anuales de caudal de fusión de hielo (m<sup>3</sup>/s) y altura de derretimiento de hielo (m) obtenidos del modelo hidro-glaciológico (desarrollado en este estudio). En caso del caudal, es convertido a volumen líquido y luego a volumen sólido. Por lo tanto, el volumen y espesor del año 2016 (obtenido en GlabTop) se suman (hasta 2020) o restan (hasta 2013) (Figura 5e). Ploteados sus datos (volumen de hielo y espesor) de cada año, ambos presentan tendencias decrecientes de 259 628 m<sup>3</sup>/año y 1.23 m/año.



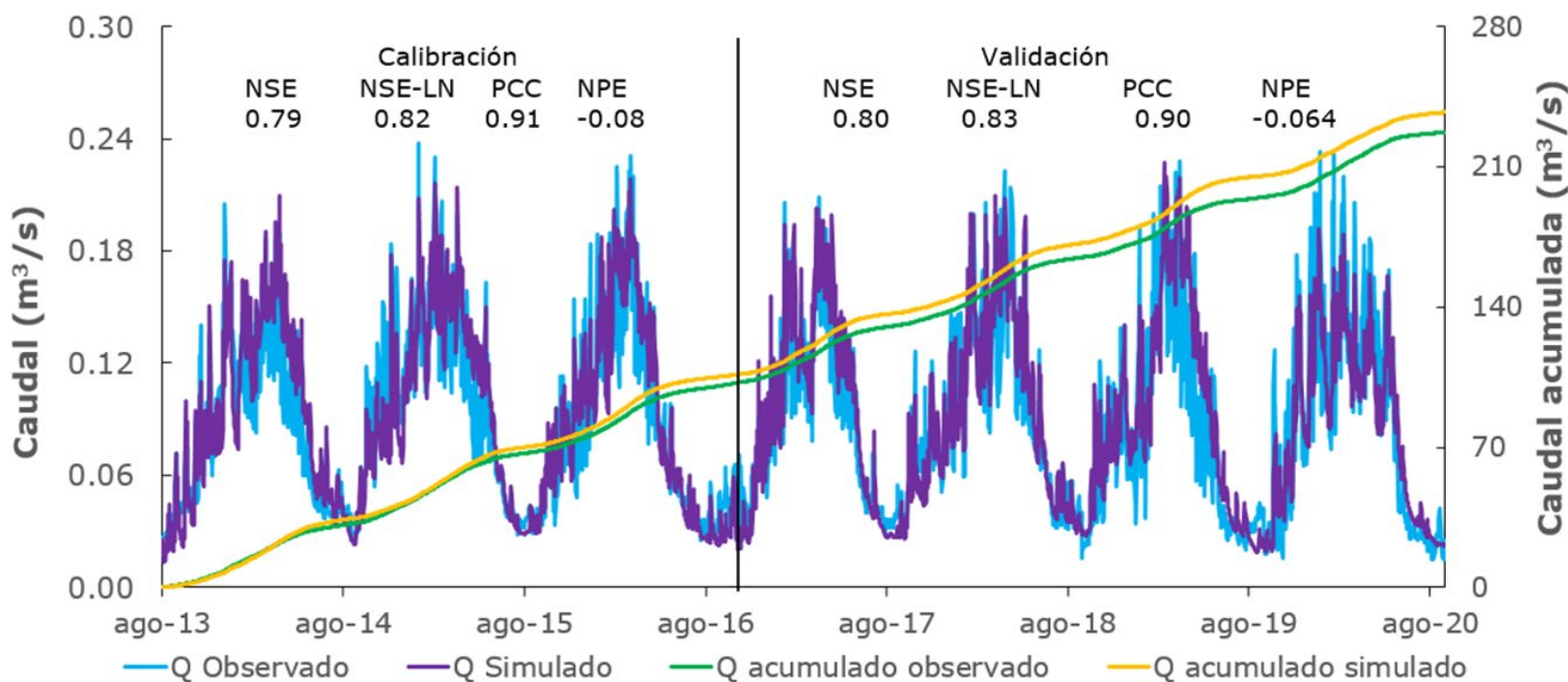
**Figura 5.** Comportamiento de parámetros físicos entre 2013 y 2020: a) mapa de glaciares anuales obtenido de imagen satelital; b) mapa de esesor de hielo del año 2016, distribuido por bandas de altitud; c) tendencia de longitud (largo, ancho y retroceso lineal); d) tendencia de superficie glaciar y no glaciar; e) tendencia de volumen y esesor.

## Calibración del modelo hidro-glaciológico

La calibración y validación se realizó a los caudales de la estación de aforo de la microcuenca Yanamarey, que representa el aporte de flujo de la zona glaciar y no glaciar. Después se evaluaron los parámetros hídricos del modelo GSM y SOCONT en el análisis de sensibilidad, e influyen significativamente a los parámetros H ( $\pm 12$  % de incertidumbre), N ( $\pm 3$  %), KG3 ( $\pm 1.5$  %) y Tcf (1.8 %). En la corrida iterativa de simulación en la plataforma RS MINERVE se obtienen los valores del parámetro que optimiza la mejor combinación (Tabla 3). También se han utilizado con éxito con el modelo GSM y SOCONT para otros estudios (Muñoz, 2017). En la Figura 6 se muestra la comparación del hidrograma de caudal diario (observado y simulado). Los indicadores estadísticos muestran Nash (NSE) superior a 0.79, coeficiente de correlación Pearson (PCC) mayor a 0.82 y error pico normalizado (NPE) mayor a -0.08. Los valores de indicadores estadísticos seleccionados se sintetizan en la función objetivo (FO) de 0.65 en representar el comportamiento de caudales del periodo 2013-2020.

**Tabla 3.** Parámetros de GSM y SOCONT obtenidos como resultado del proceso de calibración automática en RS MINERVE.

Parámetro	SOCONT	GSM	Unidad	Descripción
N	12	12	mm/°C/d	Grado día nieve
Nint	20	20	mm/°C/d	Intervalo de grado día
Nmín	4	4	mm/°C/d	Mínimo de grado día
H	-	5	mm/°C/d	Grado día glaciar
Hint	-	6	mm/°C/d	Intervalo de grado día
Hmín	-	1	mm/°C/d	Mínimo de grado día
Tcp1	-0.5	-1	°C	Temperatura crítica mínima líquida
Tcp2	0.3	0.3	°C	Temperatura crítica máxima sólida
Tcf	-2.5	-2.5	°C	Temperatura crítica nieve/hielo
Kh	-	0.05	1/d	Coeficiente de liberación por fusión de hielo
Kn	-	1	1/d	Coeficiente de liberación por fusión de nieve
TethaCri	0.1	0.1	-	Contenido de agua relativo crítico en nieve acumulada
bp	0.0125	0.0125	d/mm	Coeficiente de fusión debido a precipitación líquida



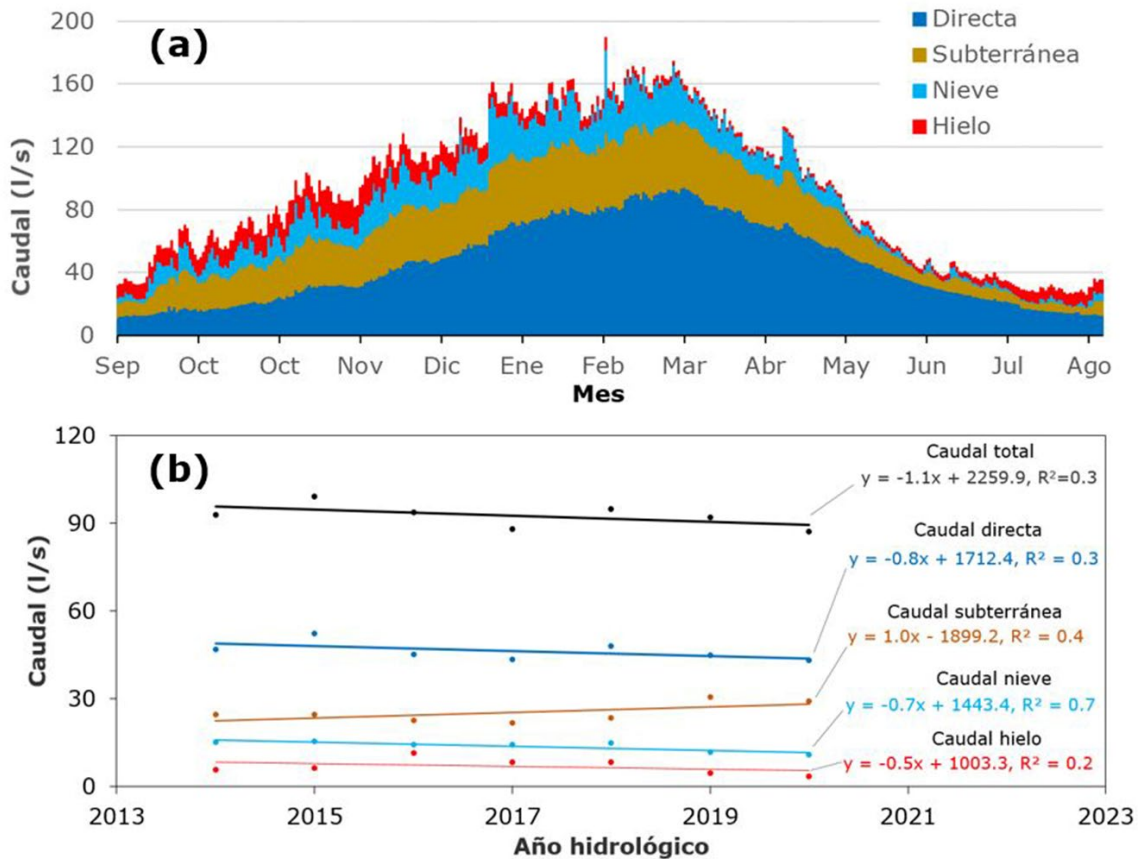
**Figura 6.** Comparación del hidrograma de caudales diarios observados y simulados con GSM y SOCONT en la estación Yanamarey, periodo 2013-2020 (NSE es coeficiente de Nash-Sutcliffe, NSE-LN es coeficiente de Nash para Logaritmos, PCC es coeficiente de correlación Pearson y NPE es error pico normalizado).

## Contribución hídrica en la microcuenca Yanamarey

La contribución hídrica diaria producida en la microcuenca Yanamarey se muestra en el hidrograma de caudales (Figura 7a). El caudal anual diario estimado es de 93 l/s, distribuidos en 7 l/s (8 % del total) de caudal de hielo, 14 l/s (15 %) de caudal de nieve, 46 l/s (50 %) de caudal directa, y 25 l/s (27 %) del caudal subterráneo o flujo base. Comparada con el



aporte anual del hielo derretido de 12 % estimada por Mark y Seltzer (2003) para una superficie de 0.52 km<sup>2</sup> del glaciar Yanamarey, difiere en 4 % al valor estimado en este estudio, esto en razón de que el tamaño del glaciar es menor, considerado de 0.26 km<sup>2</sup> en el modelo hidroglaciológico. Además, el caudal máximo para la época húmeda es 189 l/s (29 de febrero) y 174 l/s (25 de marzo), y en época seca es 82 l/s (30 de octubre) y 77 l/s (29 de octubre). En tanto, en la Figura 7b se visualiza el comportamiento de los cuatro tipos de caudales para los siete años evaluados, y se presentan las tendencias descendentes de 0.8 l/s/año (caudal directo), 0.7 l/s/año (caudal de nieve), 0.5 l/s/año (caudal de hielo) y 1.1 l/s/año (caudal total); y la tendencia ascendente de 1.0 l/s/año (caudal subterráneo). Dicha disminución evidente de la cantidad de agua de la fusión del glaciar y la precipitación tendrá impacto en esta cuenca alta en recibir menos aporte hídrico.



**Figura 7.** Caudales simulados de clima reconstruido en el periodo 2013-2020: a) hidrograma de caudal diario de la microcuenca Yanamarey; b) tendencia de los caudales (hielo, nieve, subterránea, directa y total).

En la Tabla 4 se representan los cuatro tipos de caudales diarios (anual, máximo, mínimo, estación (seca y húmeda)). Comparando los aportes de caudales entre la estación húmeda de noviembre a enero (NDE) y la estación seca de mayo a julio (MJJ) presentan lo siguiente: caudal de hielo de 5.4 veces; caudal de nieve de 3.6 veces; caudal subterráneo de 2.2 veces, y caudal directo de 1.1 veces. Además, la contribución hídrica del glaciar (hielo y nieve) en la estación seca es 13.4 % al caudal anual y en la estación húmeda es 32.1 %; la contribución

mensual de la fusión de hielo, en el mes más seco, aporta con 21 % (7 l/s) en agosto y el mayor deshielo es en noviembre con 15 l/s (17 % del mes).

**Tabla 4.** Caudal diario (anual, máximo, mínimo, y otros) en l/s.

Tipo de caudales	Anual	Máximo	Mínimo	Estación seca		Estación húmeda	
				MJJ <sup>1</sup>	ASO <sup>2</sup>	NDE <sup>3</sup>	FMA <sup>4</sup>
Hielo	7.5	18	1	2	9	13	4
Nieve	14.7	53	0	6	8	21	23
Subterránea	25.8	47	4	15	15	33	39
Directa	46.6	95	11	42	18	45	82
Total	93.4			65	50	112	148

<sup>1</sup>MJJ = mayo, junio, julio

<sup>2</sup>ASO = agosto, septiembre, octubre

<sup>3</sup>NDE = noviembre, diciembre, enero

<sup>4</sup>FMA = febrero, marzo, abril

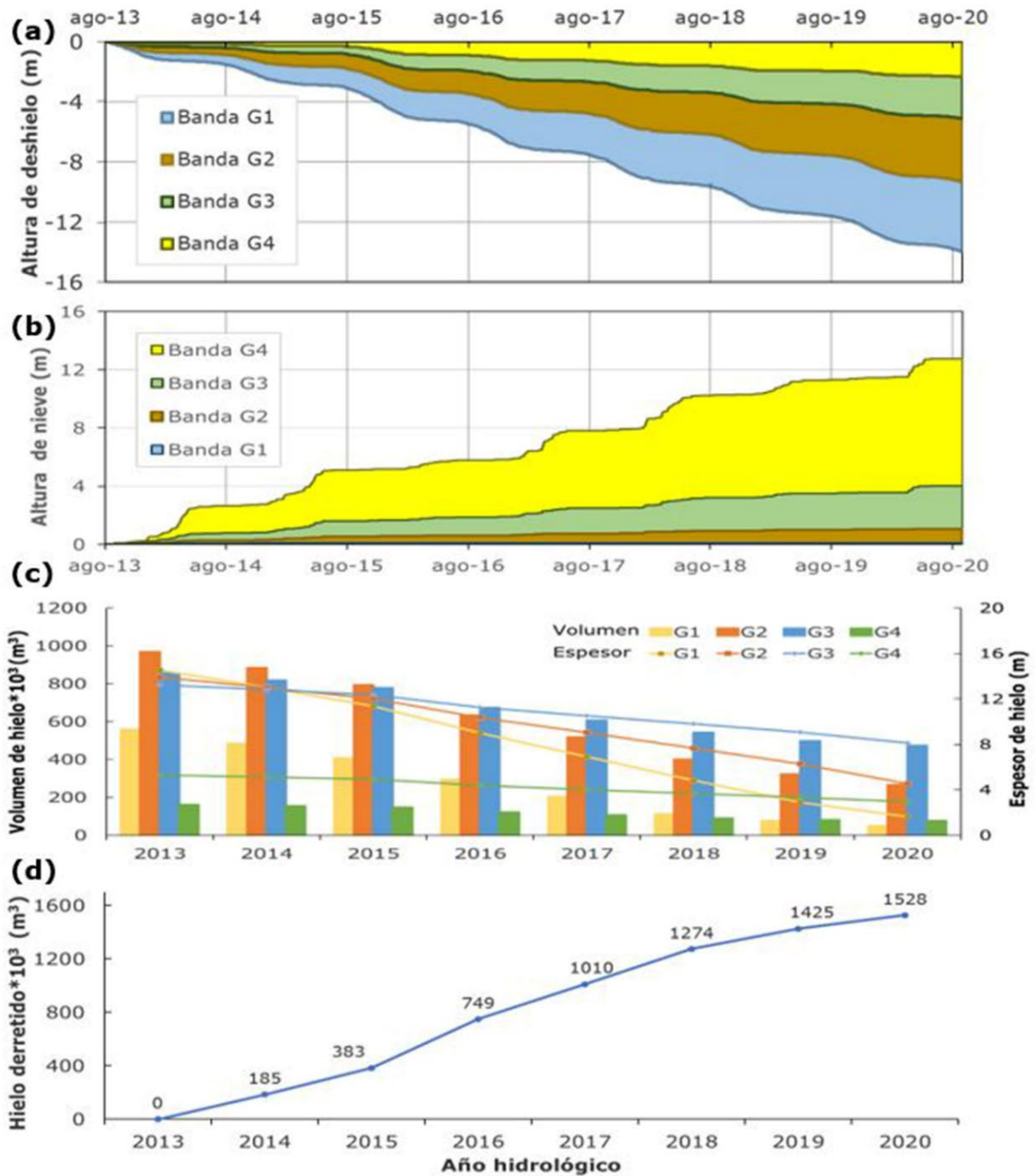
## Comportamiento de procesos hídricos en la microcuenca

### Procesos glaciológicos en zona glaciar

Los procesos en la masa glaciar de acumulación de nieve por la precipitación sólida y la pérdida por fusión de hielo por acción de la temperatura presentaron los siguientes comportamientos.

La tendencia durante y al final de los siete años en las cuatro bandas muestra: en la Figura 8a, las alturas de fusión del hielo alcanzan -14.0 m

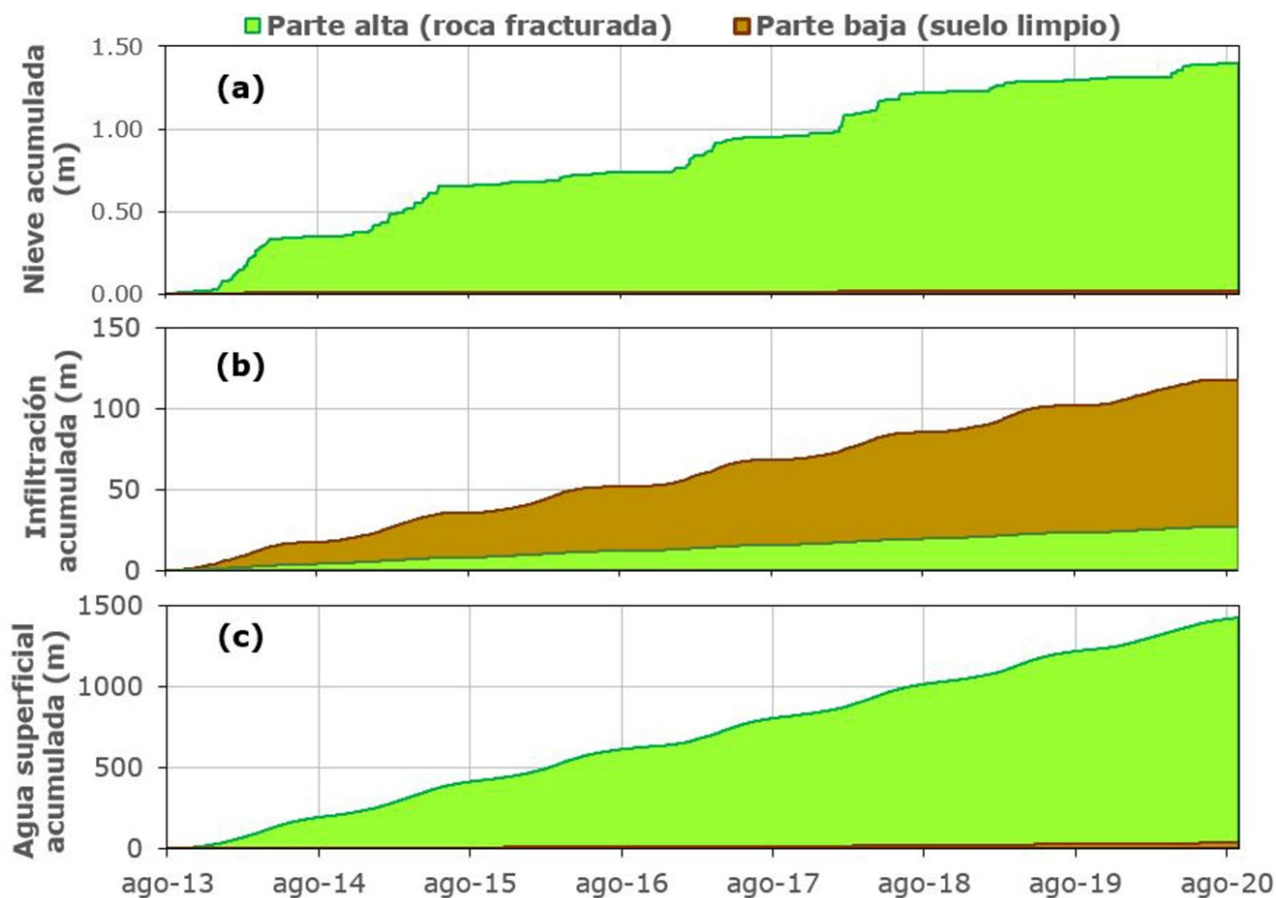
(banda G1), -9.4 m (banda G2), -5.1 m (banda G3) y -2.4 m (banda G4); el ritmo anual de fusión de hielo es -3.4 m/año en la parte baja (G1 y G2) y -1.1 m/año en la parte alta (G3 y G4); y la forma de tendencia escalonada, generada por la estación del año, húmeda (casi plana) y seca (empinada). Esta diferencia de pérdida de hielo y tamaño de escalonada se atribuye a la presencia de la nieve acumulada a cada altitud. En la Figura 8b, la altura acumulada de nieve alcanza 0.30 m (banda G1), 1.08 m (banda G2), 4.00 m (banda G3) y 12.74 m (banda G4); y la recarga anual de nieve es 2.40 y 0.20 m/año en la parte alta y baja, respectivamente. En tanto, la forma escalonada se distingue en banda G4 con acumulación alta de nieve entre los meses de enero a abril y escasa acumulación de nieve en mayo a diciembre; y en las bandas G3, G2 y G1 disminuye la forma escalonada. La Figura 8c muestra los cambios de los volúmenes y espesor de hielo por banda de altitud de 2013 a 2020. En 2013, el volumen total de hielo de 2 547 000 m<sup>3</sup> y espesor promedio de 12 m se distribuyen en banda G1 de 22 % de volumen con 15 m de espesor; G2 de 38 % de volumen con 14 m; G3 de 34 % volumen con 13 m, y G4 de 6 % volumen con 5 m. Además, al final del periodo, quedan disponibles 867 000 m<sup>3</sup> de volumen de hielo y espesor promedio de 4.3 m, distribuyendo en la banda G2 de 266 000 m<sup>3</sup> con 4.5 m de espesor y en la banda G4 de 77 000 m<sup>3</sup> y 2.9 m. En la Figura 8d se observa el volumen acumulado del derretimiento de hielo de 1 528 m<sup>3</sup> al 2020; el incremento más notorio es el año hidrológico de 2015 a 2016.



**Figura 8.** Evaluación de procesos glaciológicos entre los años 2013 y 2020: a) altura de fusión de hielo según altitud; b) altura de nieve acumulada según altitud; c) disponibilidad de hielo de volumen y espesor por bandas de altitud; d) volumen acumulado de hielo derretido por año hidrológico.

## Procesos hidrológicos en zona no glaciar

En la Figura 9 se visualizan en los siete años la altura acumulada de la nieve, agua infiltrada y agua superficial, alcanzando en la parte alta (roca fracturada) 1.39, 27 y 1 425 m, y en la parte baja (suelo limpio) 0.02, 118 y 34 m, respectivamente. La fuerte diferencia de valores entre ellos se relaciona con el tipo de cobertura y la pendiente del terreno; a la vez, forma de ondulaciones, que ascienden más rápido en la estación húmeda que en la estación seca. En cuanto a la acumulación de la altura ponderada anual en la microcuenca, es de 0.17 m/año de nieve, 5.7 m/año de infiltración y 175 m/año de agua superficial.



**Figura 9.** Evaluación de los procesos hidrológicos en zona no glaciar entre los años 2013 y 2020: a) nieve acumulada, b) agua infiltrada, c) agua acumulada.

## Discusión

La incertidumbre de los valores de los parámetros físicos de la microcuenca Yanamarey se ha logrado reducir. En el caso del contorno glaciar obtenido con imagen Landsat de resolución 30 m, se habrían subestimado porciones del perímetro; el más notorio fue el sector bajo del glaciar que cambia de forma rápida. Así, se incorporaron los datos registrados con la topografía de la parte frontal del glaciar (AEGL & ANA,

2019) para considerar las singularidades de los contornos del glaciar afectadas por relieve y geoformas (Taksi *et al.*, 2022). En tanto, el trazo manual de las medidas de líneas (largo, ancho) se realizó en relieve glaciar generado con DEM ALOS y TanDEM-X de resolución espacial de 30 y 10 m, respectivamente; pero, para reducir la precisión, se eligió TanDEM-X, que representa a mayor detalle las líneas de escurrimiento de agua y las líneas de curva de nivel. Comparada la superficie glaciar Yanamarey entre la imagen Landsat 7 con medición de equipo topográfico (parte baja del glaciar) difiere 16 % (UGRH & ANA, 2015); mientras que con imagen Sentinel de 10 m de resolución y la medición completa del glaciar Pastoruri con equipo topográfico difiere 10 % (AEGL & ANA, 2021a); en caso de volumen calculado, con el modelo GlabTop la precisión de volumen según Linsbauer *et al.* (2012) es  $\pm 30$  % y la profundidad con equipo de radar en glaciar Artesonraju (Chisolm, 2016) es 8 %.

En la modelización hidro-glaciológica se ha tenido cuidado en la selección de los valores de parámetros del modelo GSM y SOCONT; es necesario el análisis de sensibilidad debido a que el glaciar utiliza el grado día de hielo y nieve que está influenciado por la temperatura en el entorno glaciar, obteniendo 12 mm/°C/d en nieve y 5 mm/°C/d en hielo para una temperatura crítica máxima sólida de 0.3 °C. Presenta cierta similitud comparada con el glaciar Zongo de Bolivia de 350 mm/°C/mes en hielo y 550 mm/°C/mes (nieve) de 0.5 °C (Escobar, Lima, Purkey, & Yates, 2013), pero difiere con lo obtenido para glaciares de la cordillera Blanca en la cuenca Santa de 380 mm/°C/mes (nieve) y 600 mm/°C/mes (hielo) con 1.45 °C (Condom *et al.*, 2012). Esta diferencia de valores en la cordillera Blanca se relaciona, en lo evaluado por Condom *et al.* (2012), a glaciares de diferentes tamaños (de 0.005 a 10 km<sup>2</sup>) situados en rango de altitudes de 4 200 a 6 768 msnm; en tanto, en el glaciar Yanamarey,



como menciona Suarez (2007), la temperatura local influye por presentar un mayor desnivel (de 4 700 a 5 200 msnm) en tamaño pequeño (0.26 km<sup>2</sup>) y situarse en la parte más meridional de la cuenca Santa.

Respecto al comportamiento de la tendencia negativa de los caudales que se descargan en la microcuenca, sigue la misma evolución hidrológica estimada por Baraer *et al.* (2012) para la subcuenca Yanayacu, donde se encuentra la microcuenca Yanamarey. Mientras tanto, en cuanto a estimaciones de los tipos de caudales, solo el caudal de hielo ha sido estimado por Mark y Seltzer (2003); de los caudales (directo, nieve y subterránea) aún no se tienen antecedentes en esta microcuenca, por lo que los datos obtenidos pueden considerarse de referencia para futuras investigaciones.

En tanto, en los procesos hidro-glaciológicos en la microcuenca en la zona glaciar, la oficina de SCGL (AEGL & ANA, 2018) realiza el análisis de balance de masa y las mediciones del año hidrológico 2017-2018 en el glaciar. Presentan una pérdida de altura de hielo de ~ 2.7 m a la altitud de 4 750 msnm y la acumulación de altura de nieve de ~ 0.9 m en 4 950 msnm. Al compararse con el presente estudio, la pérdida y acumulación difieren en 22 y 19 %, respectivamente. Además, en lo obtenido, el mayor derretimiento de hielo en el año hidrológico 2015-2016 coincide con el evento de El Niño (Senamhi, 2021).

En zona no glaciar, el suelo limpio (producto de la morrena frontal por depósito glaciar), según lo mencionado en UGRH-E (1993), presenta una matriz arenosa limosa con baja presencia de arcilla, a la que corresponde la altura de infiltración de 0.05 m/d (0.19 cm/h), que comparada con la infiltración estimada en Green-Ampt por Chow, Maidment y Mays (1994) es suelo marga arenosa arcillosa, que tiene

coherencia al tipo de suelo, con cierta presencia de arcilla por la compactación glaciaria en cientos de años.

## Conclusiones

La investigación ha estimado la contribución hídrica representativa y los procesos hidro-glaciológicos de la microcuenca Yanamarey con presencia glaciaria, usando los modelos hidrológicos GSM y SOCONT en la plataforma RS MINERVE.

Los registros hidro-climáticos reconstruidos a una resolución temporal diaria se usaron en la calibración del modelo hidro-glaciológico. Los resultados indican que el caudal anual de 93.4 l/s está conformado por un 8 % de la fusión de hielo (7.5 l/s), un 15 % de la fusión de nieve (14.7 l/s), un 27 % de flujo base o agua subterránea (25.8 l/s) y un 50 % de escorrentía directa (46.6 l/s). En tanto, la contribución del glaciar (hielo y nieve) se distingue de 31 % en el periodo de meses de agosto a enero y 16 % en febrero a julio. Respecto a los procesos hídricos, se diferencian por su ubicación y tipo de cobertura. La relación entre las alturas acumuladas de parte alta y baja fue la siguiente: la fusión de hielo de 1:3.1; acumulación de nieve en el glaciar de 12:1; acumulación de nieve en no glaciar de 80:1; agua infiltrada acumulada de 1:4, y agua superficial acumulada de 41:1. Mientras, en los procesos geométricos, el glaciar se reduce en superficie 18 108 m<sup>2</sup>/año y en volumen en 259 628 m<sup>3</sup>/año.

Finalmente, la contribución hídrica por los procesos glaciológicos e hidrológicos en la microcuenca Yanamarey refleja una tendencia de disminución de aporte de agua hacia el río Santa y sus consecuencias en

los próximos años serán el déficit de agua en comunidades y ciudades con cuencas glaciares.

### Agradecimientos

Los autores de este artículo agradecen a la Oficina de Seguimiento al Comportamiento de Glaciares y Lagunas de la Autoridad Nacional del Agua por proporcionar los datos hidrometeorológicos. Asimismo, agradecen al IRD de Francia por la asesoría técnica en el tema de modelización hidro-glaciológica.

### Referencias

- AEGL & ANA, Área de Evaluación de Glaciares y Lagunas & Autoridad Nacional del Agua. (2018). *Evaluación de la disponibilidad de recursos hídrico en glaciares en un contexto de cambio climático en las cordilleras del Perú*. Huaraz-Ancash, Perú: Área de Evaluación de Glaciares y Lagunas & Autoridad Nacional del Agua.
- AEGL & ANA, Área de Evaluación de Glaciares y Lagunas & Autoridad Nacional del Agua. (2019). *Retroceso glaciar en la cordillera Blanca 1948-2018*. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12543/3770>
- AEGL & ANA, Área de Evaluación de Glaciares y Lagunas & Autoridad Nacional del Agua. (2020). *Cuantificación de glaciares de la cordillera Blanca*. Huaraz-Ancash, Perú: Área de Evaluación de Glaciares y Lagunas & Autoridad Nacional del Agua.

AEGL & ANA, Área de Evaluación de Glaciares y Lagunas & Autoridad Nacional del Agua. (2021a). *Pastoruri 40 años de estudios glaciológicos*. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12543/4779>

AEGL & ANA, Área de Evaluación de Glaciares y Lagunas & Autoridad Nacional del Agua. (2021b). *Reserva hídrica de glaciares del Perú*. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12543/4802>

Alfaro, R., & Pacheco, R. (2000). Aplicación de algunos métodos de relleno a series anuales de lluvia de diferentes regiones de Costa Rica. *Revista Tópicos Meteorológicos*, 7(1), 41-51. Recuperado de <https://www.yumpu.com/es/document/read/13138363/aplicacion-de-algunos-metodos-de-relleno-a-series-anuales-de-lluvia>

Baraer, M., Mark, B. G., Mckenzie, J. M., Condom, T., Bury, J., Huh, K., Portocarrero, C., & Rathay, S. (2012). Glacier recession and water resources in Peru's cordillera Blanca. *Journal of Glaciology*, 58(207), 134-150. DOI: 10.3189/2012JoG11J186

Bennett, J. C., Robertson, D. E., Ward, P. G. D., Hapuarachchi, H. A. P., & Wang, Q. J. (2016). Environmental modelling & software calibrating hourly rainfall-runoff models with daily forcings for stream flow forecasting applications in meso-scale catchments. *Environmental Modelling and Software*, 76, 20-36. DOI: 10.1016/j.envsoft.2015.11.006

Bodian, A., Dezetter, A., Deme, A., Djaman, K., & Diop, A. (2018). Future climate change impacts on streamflows of two main west Africa river basins: Senegal and Gambia. *Hydrology*, 18. DOI: 10.3390/hydrology5010021

- Bomshoms-Calvelo, M., Quispe-Gutiérrez, N., & Quispe-Vega, K. (2018). Estudio de la frecuencia de nevadas en el Perú. Recuperado de <http://repositorio.ana.gob.pe/handle/ANA/2330>
- Carey, M., Huggel, C., Bury, J., Portocarrero, C., & Haeberli, W. (2012). An integrated socio-environmental framework for glacier hazard management and climate change adaptation: Lessons from Lake 513, Cordillera Blanca, Peru. *Climatic Change*, 112(3-4), 733-767. DOI: 10.1007/s10584-011-0249-8
- Chisolm, R. E. (2016). *Climate change impacts and water security in the Cordillera Blanca, Peru* (tesis de doctorado). University of Texas at Austin, USA. Recuperado de <http://hdl.handle.net/2152/41583>
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill (original work published in 1988).
- Condom, T., Escobar, M., Purkey, D., Pouget, C., Suarez, W., Ramos, C., Apaéstegui, J., Tacsí, A., & Gomez, J. (2012). Simulating the implications of glaciers' retreat for water management: A case study in the Rio Santa basin, Peru. *Water International*, 37(4), 442-459. DOI: 10.1080/02508060.2012.706773
- Dozier, J. (1989). Spectral signature of Alpine snow cover from the landsat thematic mapper. *Remote Sensing of Environment*, 28, 9-22. DOI: 10.1016/0034-4257(89)90101-6
- Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V. (1994). Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology*, 158(3-4), 265-284. DOI: 10.1016/0022-1694(94)90057-4

- Escobar, M., Lima, N., Purkey, D., & Yates, D. (2013). Modelación hidrológica y escenarios de cambio climático en cuencas de suministro de agua de las ciudades La Paz y El Alto, Bolivia. *Aqua-LAC*, 5, 2-4. DOI: 10.29104/phi-aqualac/2013-v5-2-03
- García, J., Paredes, J., Foehn, A., Roquier, B., & Fluixa, J. (2019). *RS MINERVE - Technical manual V2.21*. Sion Switzerland: Centre de Recherche sur L'environnement Alpin (CREALP). Recuperado de <https://www.crealp.ch/rs-minerve/>
- Guo, W., Liu, S., Xu, J., Wu, L., Shanguan, D., Yao, X., Wei, J., Bao, W., Yu, P., Liu, Q., & Jiang, Z. (2015). The second Chinese glacier inventory: Data, methods and results. *Journal of Glaciology*, 61(226), 357-372. DOI: 10.3189/2015JoG14J209
- Haeberli, W., & Hoelzle, M. (1995). Application of inventory data for estimating characteristics of and regional climate-change effects on mountain glaciers: A pilot study with the European Alps. *Annals of Glaciology*, 206-212. DOI: 10.1017/S0260305500015834
- Hall, D. K., & Riggs, G. A. (2011). Normalized-Difference Snow Index (NDSI). In: *Encyclopedia of snow, ice and glaciers*, 779-80. Netherlands: Springer. DOI: 10.1007/978-90-481-2642-2
- Hidrandina, S. A. (1989). Inventario de glaciares del Perú. En: *Concytec. San Borja-Perú* (278 pp.). Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12543/4973>
- Ilbay, M., Fonseca, K., Quichimbo, A., & Lara, R. (2017). Estimación de datos faltantes de precipitación en la subcuenca del río Patate. *Revista Bases de La Ciencia*, 2, 37-48. DOI: 10.33936/rev\_bas\_de\_la\_ciencia.v2i3.1079

- Khadka, M., Kayastha, R. B., & Kayastha, R. (2020). Future projection of cryospheric and hydrologic regimes in Koshi River basin, Central Himalaya, using coupled glacier dynamics and glacio-hydrological models. *Journal of Glaciology*. DOI: 10.1017/jog.2020.51
- Linsbauer, A., Paul, F., & Haeberli, W. (2012). Modeling glacier thickness distribution and bed topography over entire mountain ranges with GlabTop: Application of a fast and robust approach. *Journal of Geophysical Research*. DOI: 10.1029/2011JF002313
- López-Moreno, J. I., Valero-Garcés, B., Mark, B., Condom, T., Revuelto, J., Azorín-Molina, C., & Bazo, J. (2017). Science of the total environment hydrological and depositional processes associated with recent glacier recession in Yanamarey catchment, Cordillera Blanca (Peru). *Science of the Total Environment*, 579, 272-282. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.11.107
- Marek, G. W., Gowda, P. H., Evett, S. R., Baumhardt, R. L., Brauer, D. K., Howell, T. A., Marek, T. H., Srinivasan, R., & Point, I. (2016). Calibration and validation of the SWAT model for predicting daily ET over irrigated crops in the Texas High Planins using lysimetric data. *Evapotranspiration: Monitoring & Modeling in Multiple Lnd Uses*, 59(2), 611-622. DOI: 10.13031/trans.59.10926
- Mark, B., & Seltzer, G. (2003). Tropical glacier meltwater contribution to stream discharge: a case study in the cordillera Blanca, Perú. *Journal of Glaciology*, 165(271-281). Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12543/3366>
- Medina, R. D. (2008). *Estimación estadística de valores faltantes en series históricas de lluvia*. Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira. Recuperado de <https://hdl.handle.net/11059/21>

- Merz, R., Parajka, J., & Blo, G. (2009). Scale effects in conceptual hydrological modeling. *Water Resources Research*, 45(September), 1-15. DOI: 10.1029/2009WR007872
- Müller, F., Caflisch, T., & Müller, G. (1977). Instructions for compilation and assemblage of data for a world glacier inventory. Recuperado de [https://www.wgms.ch/downloads/Mueller\\_etal\\_UNESCO\\_1977.pdf](https://www.wgms.ch/downloads/Mueller_etal_UNESCO_1977.pdf)
- Muñoz, R. (2017). Impacto del cambio climático en los recursos hídricos de la subcuenca Quillcayhuanca, Perú (tesis de maestría en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente). Universidad Politécnica de Valencia, España. Recuperado de <https://riunet.upv.es/handle/10251/80276>
- Muñoz, R., Huggel, C., Drenkhan, F., Vis, M., & Viviroli, D. (2021). Comparing model complexity for glacio-hydrological simulation in the data-scarce Peruvian Andes. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 37(January). DOI: 10.1016/j.ejrh.2021.100932
- Oudin, L. (2005). *Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global*. Paris, France: These, Ecole Nationale Du Genie Rural, Des Eaux et Des Forets. Recuperado de <https://theses.hal.science/pastel-00000931/>
- Paul, F., Barry, R. G., Cogley, J. G., Frey, H., Haeberli, W., Ohmura, A., Ommanney, C. S. L., Raup, B., Rivera, A., & Zemp, M. (2009). Recommendations for the compilation of glacier inventory data from digital sources. *Annals of Glaciology*, 50(53), 119-126. DOI: 10.3189/172756410790595778



- Racoviteanu, A. E., Arnaud, Y., Williams, M. W., & Ordon, J. (2008). Decadal changes in glacier parameters in the Cordillera Blanca , Peru, derived from remote sensing. *Journal of Glaciology*, 54(186), 499-510. DOI: 10.3189/002214308785836922
- Ramírez, E. (2008). Impactos del cambio climático y gestión del agua sobre la disponibilidad de recursos hídricos para las ciudades de La Paz y El Alto. *Revista Virtual REDESMA*, 2(3), 49-61. Recuperado de <https://cebem.org/revistaredesma/vol5/articulo6.php?id=c1>
- Schaefli, B., Hingray, B., Niggli, M., & Musy, A. (2005). A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2(1), 73-117. DOI: 10.5194/hessd-2-73-2005
- Seehaus, T., Malz, P., Sommer, C., Lippl, S., Cochachin, A., & Braun, M. (2019). Changes of the tropical glaciers throughout Peru between 2000 and 2016 – Mass balance and area fluctuations. *The Cryosphere*, 2537-2556. DOI: 10.5194/tc-13-2537-2019
- Senamhi, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. (2021). *Fenómeno El Niño/La Niña* (Boletín 06, 06, junio). Lima, Perú: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. Recuperado de <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02216SENA-84.pdf>
- Silverio, W., & Jaquet, J. (2005). Glacial cover mapping (1987-1996) of the Cordillera Blanca (Perú) using satellite imagery. *Elservier*, 95, 342-350. DOI: 10.1016/j.rse.2004.12.012
- Suarez, W. (2007). Le bassin versant du fleuve Santa (Andes du Pérou): dynamique des écoulements en contexte glacio-pluvio-nival. *Thèse*, l'Universite Montpellier-France. Recuperado de <https://theses.fr/2007MON20185>

- Tacsi, A., Condom, T., Cochachin, A., & Montalvo, N. (2022). Seguimiento del comportamiento de tamaño morfométrico de glaciares y la relación de clima regional en la latitud 8 °-16 ° S, Perú. *Aqua-LAC*, 14(1). DOI: 10.29104/phi-aqualac/2022-v14-1-04
- Tacsi, A., Condom, T., Garcia, J., Cochachin, A., & Mejia, A. (2021). Modelización hidro-glaciológico actual y futura de la microcuenca Yanamarey en la cordillera Blanca, Perú. *Aqua-LAC*, 13(1), 108-127. DOI: 10.29104/phi-aqualac/2021-v13-1-08
- UGRH & ANA, Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos-Autoridad Nacional del Agua. (2015). *Inventario de glaciares de la Cordillera Blanca*. Huaraz-Ancash, Perú: Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos-Autoridad Nacional del Agua.
- UGRH-E, Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos-Electroperú. (1993). *Estudio geológico en la sub-cuenca del río Yanayacu*. Huaraz-Ancash, Perú: Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos-Electroperú.