

ANALYSIS OF FLOW SIGNALS IN GLACIERS SMALLER THAN 25 HECTARES: PROPOSAL FOR A NEW AREA THRESHOLD FOR GLACIERS

ANÁLISIS DE SEÑALES DE FLUJO EN GLACIARES MENORES DE 25 HECTÁREAS: PROPUESTA DE UN NUEVO UMBRAL DE ÁREA PARA GLACIARETES

Alexis Segovia Rocha,^{1,3} Catalina Acevedo Caro.²

RESUMEN: Se realizó un análisis de las señales que denotan el movimiento presente o pasado de los glaciaretes -es decir, masas de hielo menores a 25 hectáreas (ha), según el inventario público de glaciares IPG2022-, para determinar las frecuencias de los rasgos de señales de flujo analizados en rangos cada 5 ha y por cada macrozona glaciológica (norte, sur, centro y austral). Esto, con el fin de establecer relaciones entre área glaciar y número y frecuencia de señales de flujo, a modo de proponer un nuevo umbral de área para la definición de glaciarete. Para lograrlo, se trabajó con la codificación del término presente en el inventario público de glaciares del año 2022 (IPG2022), el cual ocupa la clasificación de Cogley et al., (2011), quien los define como "un glaciar muy pequeño, menor a 0,25 km² (25 ha) de extensión, sin un patrón marcado de flujo visible en superficie". En total, se analizaron 1.573 glaciares mediante los programas Google Earth, Google Engine y Base Map Arcgis. Se pudo determinar que, en glaciaretes menores a 15 ha de superficie, existe una marcada ausencia de morfologías que puedan indicar movimiento, las cuales aumentan de manera significativa en glaciaretes mayores de 15 ha, superando en varias señales de flujo el 60%. En vista de estos resultados, se concluye que los glaciaretes con tamaño superior a 15 hectáreas pueden ser glaciares con condiciones de movimiento activo y presente, esto debido a que, en su mayoría presentan al menos un signo de flujo, y en su totalidad poseen el espesor y la tensión necesaria para deformarse. Por lo que se estima que la definición de glaciarete debería limitarse a cuerpos de hielo o manchones de nieve perenne con áreas menores a menor a 15 ha.

Palabras clave: glaciar; glaciarete; flujo glaciar; grietas; morfología glaciar.

Recibido Noviembre 2024/Aceptado Diciembre 2024.

1. Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

2. Universitat de Barcelona, Departamento de Geografía, Barcelona, Catalunya, España.

3. Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

 <https://orcid.org/0009-0004-1731-1777>

ABSTRACT: An analysis was carried out on the signals that denote the present or past movement of "glacieret" (glaciers smaller than 25 ha according to the public glacier inventory IPG2022), in order to determine the frequencies of flow signal features analyzed in ranges every 5 ha and for each glaciological macrozone (North, South, Center and Austral), in order to establish relationships between glacier area and number and frequency of flow signals, in order to propose a new area threshold for the definition of "glacieret". For this, we worked with the "glacieret" coding present in the public glacier inventory of the year 2022 (IPG2022), which occupies the classification of Cogley et al., (2011), who defines a glacieret as "a very small glacier, less than 0.25 km² (25 ha) in size, without a marked flow pattern visible on the surface". In total, 1,573 glaciers were analyzed using Google Earth, Google Engine, and Base Map Arcgis. The results showed that in glacieret with a surface area of less than 15 hectares there is a marked absence of morphologies that may indicate movement, which increase significantly in glacieret larger than 15 ha, exceeding 60% in several flow signals. In view of these results, it is concluded that glacieret larger than 15 hectares may be glaciers with active and present movement conditions, this is because most of them present at least one sign of flow, and all of them have the thickness and tension necessary to deform. Therefore, it is estimated that the definition of "glacieret" should be limited to bodies of ice or patches of perennial snow with areas less than 15 ha.

Keywords: glacier; small glacier; glacial flow; crevasses; glacial morphology.

INTRODUCCIÓN

En Chile, el principal aporte hídrico proviene de zonas cordilleranas con predominancia nivoglaciaria, lo que genera que la sociedad y los ecosistemas del país sean montaña-dependiente (Segovia y Videla, 2017). Peña y Nazarala (1987) y estudios recientes afirman que el aporte glaciar en las cuencas de Chile central alcanza sobre el 60% durante los meses de verano para un año muy seco (Casassa et al., 2015; Castillo, 2015; Ayala et al., 2020). Esta importancia al aporte y regulación hídrica se replica en otras partes del mundo, por ejemplo, en los Pirineos, donde el glaciar D'Ossue aporta alrededor de 300 m³/ha/día en días soleados (Cancer et al., 2001), y en Asia, donde, cada verano, los glaciares de la alta montaña asiática entregan alrededor de 36 km³ de agua a las cuencas de

Pakistán, Afganistán, Tayikistán, Turmenistán, Uzbequistán y Kerguistán, equivalente a las necesidades hídricas absolutas de 221 millones de personas durante el período (Pritchard, 2019).

Según Herrera y Segovia (2019), en Chile se han presentado diversos proyectos legislativos para otorgar protección ambiental a los glaciares, sin embargo, pese a estos esfuerzos, el país aún carece de un cuerpo legal específico sobre protección y conservación de esas masas de hielo y su entorno. Para el año 2014, se implementó el primer inventario de glaciares realizado por la Unidad de Glaciología y Nieves de la Dirección General de Aguas (DGA), a través de la Estrategia Nacional de Glaciares (DGA-CECS, 2009). Y el año 2022, se realizó un segundo inventario público por parte de la Unidad de Glaciología

y Nieves de la DGA, el cual contempla una actualización y comparación con el escenario de los glaciares en Chile.

En ambos registros se utiliza la clasificación primaria de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), que clasifica a los glaciares en cuatro tipos: de montaña glaciar, es decir, ubicado en la ladera de una montaña, mayor o igual a 25 hectáreas; de valle, cuyo cuerpo principal se ubica en un valle mayor o igual a 25 hectáreas; efluente, que drena desde un campo de hielo, mayor o igual a 25 hectáreas y glaciarete, cuyo tamaño es menor 25 hectáreas (Dirección General de Aguas [DGA], 2022; Rau et al., 2005; Rau et al., 2005; WGI, 2018; World Glacier Monitoring Service [WGMS], 2020).

En este artículo se trabajará con la clasificación y codificación presentada como glaciarete y manchón de nieve, categorizada en el segundo inventario como cuerpos de hielo menores a 25 ha según la clasificación de Cogley et al., (2011), quien, a su vez, los define como "un glaciar muy pequeño, menor a 0,25 km² (25 ha) de extensión, sin un patrón marcado de flujo visible en superficie".

De esta manera, en la presente investigación se realiza la observación de las evidencias de flujo de 1.573 glaciaretes, según intervalos de tamaño cada 5 ha a través de los softwares: Google Earth, Google Engine y Base Map Arcgis, con el fin de determinar el umbral de área que hace que un cuerpo de hielo presente o no señales de flujo y, por lo tanto, poner en discusión un nuevo umbral para la clasificación de glaciarete.

PROBLEMÁTICA Y ANTECEDENTES

En la literatura, varios autores definen glaciarete y manchón de nieve. Müller et al., (1977), plantean que son pequeñas masas de hielo de forma indefinida en huecos, lechos de ríos o en laderas protegidas que se han desarrollado a partir de la deriva de la nieve, avalanchas y/o acumulación particularmente pesada en ciertos años y que, por lo general, no se observa un patrón de flujo marcado; y ha existido por lo menos durante dos años consecutivos. Por su parte, Leigh et al., (2019), realizaron un mapeo de glaciares muy pequeños, expresando que estos son todos los glaciares menores a 50 ha. Sin embargo, la clasificación de UNESCO para glaciarete, se basa en Cogley et al., (2011), quien lo define como un cuerpo de hielo que presenta un tamaño menor a 25 ha sin un patrón marcado de flujo visible en superficie.

Sin embargo, potencialmente, algunos cuerpos de hielo menores a 25 ha podrían presentar marcadas características de flujos, esencialmente representadas por distintos tipos de grietas, rimayas, seracs y ojivas.

En cuanto a la mecánica de glaciares, la estructura cristalina del hielo es imperfecta, y esta imperfección se traduce en las deformaciones que todo glaciar presenta. Esto permite que el hielo se deforme bajo estrés (Hooke, 2005). Los desplazamientos del hielo juegan un papel fundamental en la deformación o agrietamiento de los materiales cristalinos del glaciar, principalmente formados en los puntos de estrés y los márgenes (Cuffey y Paterson, 2010). Es necesario enfatizar que un glaciar se comporta como un cuerpo que presenta cierta plasticidad y viscosidad, y que, al tener puntos de tensión -ya sea, por

consecuencia de su misma masa o por la acción de la gravedad, contienen puntos de quiebre, que generan rasgos indicadores de movimiento en un periodo determinado (Lliboutry, 1956).

El comportamiento plástico mencionado anteriormente es consecuencia de la alta presión que alcanza un punto crítico en la acumulación de masa y la pendiente, esto aplica una fuerza de cizallamiento en toda la masa, produciendo una deformación plástica (Cuffey y Paterson, 2010).

Marangunic (2019), indica que con cargas de presión sobre los 100 kpa en glaciares templados, y sobre 150 kpa en glaciares fríos, lo cual equivale a una carga de espesor de alrededor de 11 m de hielo de densidad $0,9 \text{ g/cm}^3$, provoca la deformación visco-plástica. Por lo tanto, todo glaciar con un espesor mayor a este umbral, potencialmente mostrará flujo y deformación.

Cabe destacar que las velocidades del fluido no son homogéneas dentro del glaciar, siendo más rápido en el centro de la lengua y más lento en sus márgenes, lo que provoca diferentes morfologías (Hooke, 2005). Como se mencionó anteriormente, existen morfologías o formas locales dentro del glaciar, siendo las más importantes, los seracs, la rimaya, las ojivas y grietas, estas últimas pudiendo ser, longitudinales, transversales y marginales. Los seracs son grandes bloques de hielo producto de numerosas y complejas grietas producidas por abruptos cambios de pendiente y movimiento acelerado del glaciar, comúnmente formados por la intersección de fracturas (V. P. Singh et al., 2011). La rimaya es una grieta ubicada en la cabecera del glaciar, que separa el hielo con el movimiento pendiente abajo, separando el hielo activo

del no activo (V. P. Singh et al., 2011). Las ojivas son una serie de cordones de ondas con forma convexa hacia aguas abajo del glaciar, la separación entre cresta y cresta representa la velocidad de avance anual del glaciar (Lliboutry, 1956). En cuanto a las grietas, según Cuffey y Paterson (2010), se encuentran: Grietas longitudinales: paralelas al flujo del glaciar, se producen debido a la fuerza de tensión hacia los márgenes del mismo.

Grietas transversales: ubicadas de forma transversal al flujo del glaciar, en las zonas de tensión por movimiento extensivo, o en donde haya un aumento de la pendiente que supera la respuesta plástica del hielo. Grietas marginales: fracturas ubicadas en el límite del glaciar y de ahí se extienden al centro de este, formando grietas con un ángulo de $\sim 45^\circ$ respecto a los márgenes. En consecuencia, como potencialmente algunos cuerpos de hielo menores a 25 ha podrían presentar características de flujos marcadas, es necesario determinar en qué rango de área se produce una diferencia significativa entre cuerpos de hielo que si presentan predominantemente flujo de los que no, esto con el fin de proponer un nuevo corte de área para la clasificación de glaciarete.

METÓDO

Se implementó una metodología mixta, a partir de la cual, de acuerdo con Hernández et al., (2010), se logra la recolección, análisis y vinculación de datos cuantitativos y cualitativos para responder la problemática.

Como metodología, primero se realizó una búsqueda bibliográfica de las

Tabla 1: Intervalos de muestra.

	Intervalo	Rango
Glaciares (<25 ha)	I	$\geq 1 \text{ a} < 5 \text{ Ha.}$
	II	$\geq 5 \text{ a} < 10 \text{ Ha.}$
	III	$\geq 10 \text{ a} < 15 \text{ Ha.}$
	IV	$\geq 15 \text{ a} < 20 \text{ Ha.}$
	V	$\geq 20 \text{ a} < 25 \text{ Ha.}$
Glaciares ($\geq 25 \text{ ha}$)	VI	$\geq 25 \text{ a} < 30 \text{ Ha.}$

Fuente: Elaboración propia.

características físicas que hacen que un cuerpo de hielo presente movimiento y flujo. Posteriormente, a través de la geo-referenciación de los glaciares en los softwares Arcmap y Google Earth, se continuó con la cuantificación de la cantidad de glaciares existentes en todas de las zonas glaciológicas de Chile y se extrajo una muestra de cada una.

De esta manera, se dividió la cantidad de glaciares en intervalos de 5 ha y, para cada uno de los intervalos, se tomó una muestra máxima de 100 glaciares por intervalo y por macrozona glaciológica, y en caso de presentar una menor cantidad, se tomó la totalidad de glaciares existentes en ese intervalo y en esa zona glaciológica.

Esto con el fin de determinar cuáles rangos de tamaño presentan más evidencias morfológicas de flujo (Tabla 1 y Tabla 2).

El inventario público de glaciares del año 2022 tiene 18.211 glaciares, por lo que la muestra de 1.573 glaciares analizados representa un error de menos del 3% y con un intervalo de confianza de 95%.

Para finalizar, a través de la visualización y observación de los 1.573 glaciares seleccionados, se realizó una tabulación de la presencia o ausencia de características de flujos de los 6 signos mencionados en el apartado teórico. Luego de esto, se procedió al manejo de datos estadísticos por cada intervalo de tamaño, obtenido la frecuencia de presencia de cada uno de los aspectos considerados.

Luego, se relacionó factores de espesor y de presión con dinámicas de flujo. Para esto se llevó a cabo una búsqueda y consulta bibliográfica. Para calcular el espesor del hielo glaciar, se utilizó la fórmula de Chen & Omura (1990), la cual es:

$$\text{Fórmula de cálculo de espesor}$$

$$h = 28,5 * (\text{sup km}^2)^{0,357}$$

Tabla 2: Subdivisión de glaciares.

Zona↓/ Rango→	$\geq 1 \text{ a}$ < 5 Ha.	$\geq 5 \text{ a}$ < 10 Ha.	$\geq 10 \text{ a}$ < 15 Ha.	$\geq 15 \text{ a}$ < 20 Há	$\geq 20 \text{ a}$ < 25 Há.	Total
Austral	100	100	100	100	100	500
Sur	100	100	100	100	100	500
Centro	100	100	86	39	28	353
Norte	100	69	27	12	12	220
Total	400	369	313	251	240	1.573

Fuente: Elaboración propia.

Donde: h = espesor promedio en metros del cuerpo de hielo; sup km^2 = superficie en km^2 del cuerpo de hielo.

Luego de esto, se calculó el estrés de cizallamiento a través la fórmula de Cuffey y Paterson (2010), la cual es:

Fórmula de cálculo de estrés

$$td = p \cdot g \cdot h \cdot \sin \alpha$$

td = estrés (kpa).

p = densidad (917 kg/m^3).

g = aceleración de gravedad ($9,807 \text{ m/s}^2$).

α = pendiente en grados.

De esta manera, se relacionó la teoría con los resultados numéricos, enlazando datos estáticos mostrados de la presencia o ausencia de signos de flujo, con umbrales de espesor y de presión de cizallamiento de los mismos glaciares.

Por último, se compararon glaciaretos con glaciares de tamaño de 25 a 30 ha, para determinar si realmente existe una diferencia notoria en las señales de flujo entre lo que en la actualidad se considera glaciarete, por su tamaño reducido, y los glaciares que ya no pertenecen a esta categoría por superar las 25 ha.

RESULTADOS

El flujo glaciar es consecuencia de la presión generada por la acumulación de masa, y esta presión genera diferentes marcas en el hielo, como las grietas marginales, grietas transversales, grietas longitudinales, rimayas, ojivas, y seracs (Liboutry, 1956; Cuffey y Paterson, 2010).

Respecto a lo anterior, en la Figura 1 se puede observar, en términos generales, que la grieta transversal es el signo de mayor presencia en los 1.573 glaciaretos

Presencia/ausencia de signos de flujo de glaciaretos.

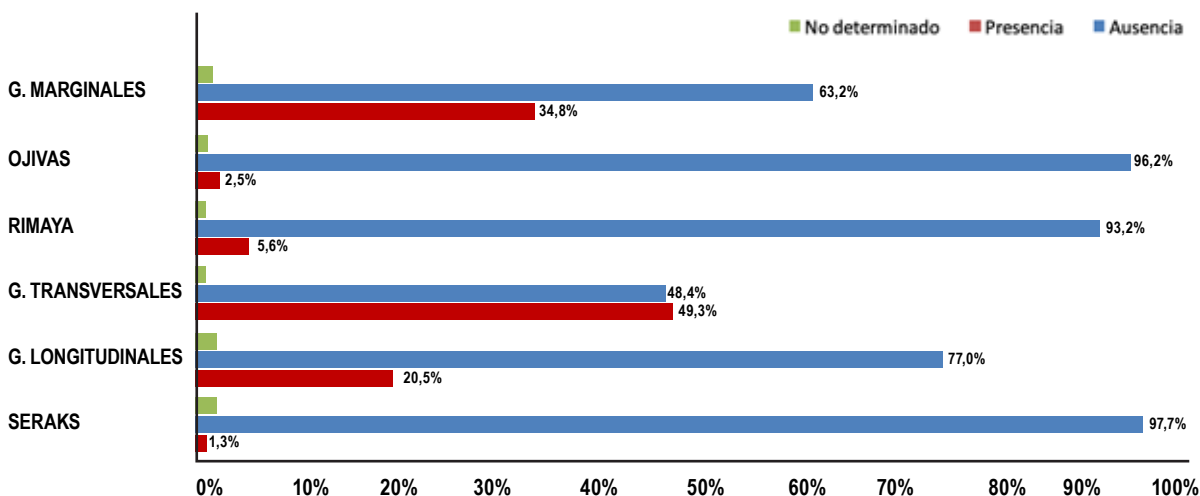


Figura 1. Presencia y ausencia de signos de flujo para todos los glaciares estudiados.

Fuente: Elaboración propia.

Glaciares con presencia de los 3 tipos de Grietas (Transversal, Marginal, Longitudinal)

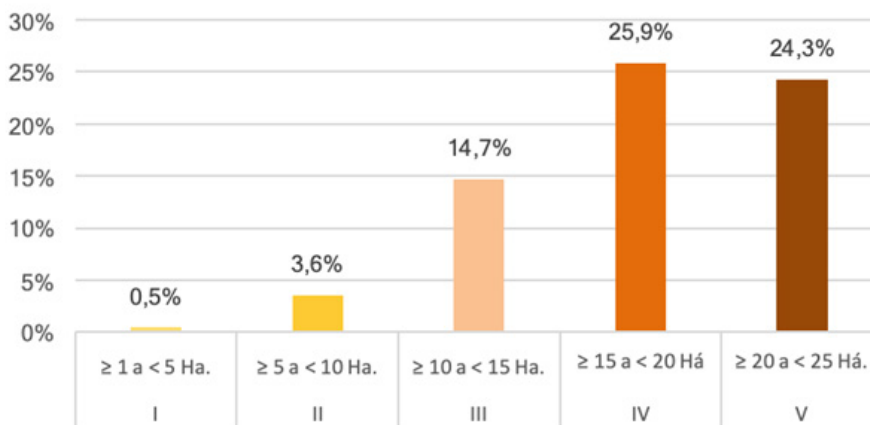


Figura 2. Presencia de los tres tipos de grietas por rango de tamaño. Fuente: Elaboración propia.

estudiados, con un total del 49,3% de los glaciares (707 glaciaretes del total nacional). La segunda evidencia de flujo con mayor presencia corresponde a la grieta marginal, llegando al 34,8% (547 glaciaretes), y en tercer lugar se encuentra la grieta longitudinal, llegando al 20,5% de los glaciaretes, (322 glaciaretes). Por último, la morfología de flujo que muestra menor presencia corresponde a los seracs, encontrándose solamente 20 glaciaretes, lo que representa un 1,3% del total.

Los tres signos de flujo que presentan mayor presencia corresponden a los tres tipos de grietas: en el intervalo n° I, el porcentaje de glaciaretes con los tres tipos de grietas sólo llega al 0,5%; mientras que en el intervalo de tamaño n° II alcanza el 3,6%. Este porcentaje aumentó un poco más en el intervalo n° III con un 14,7%, llegando a su máximo en el intervalo número IV, donde el 25,9% de los glaciaretes observados presentan los tres tipos de grietas.

Presencia/ausencia de signos de flujo de glaciaretes de 1 a 5 Ha.

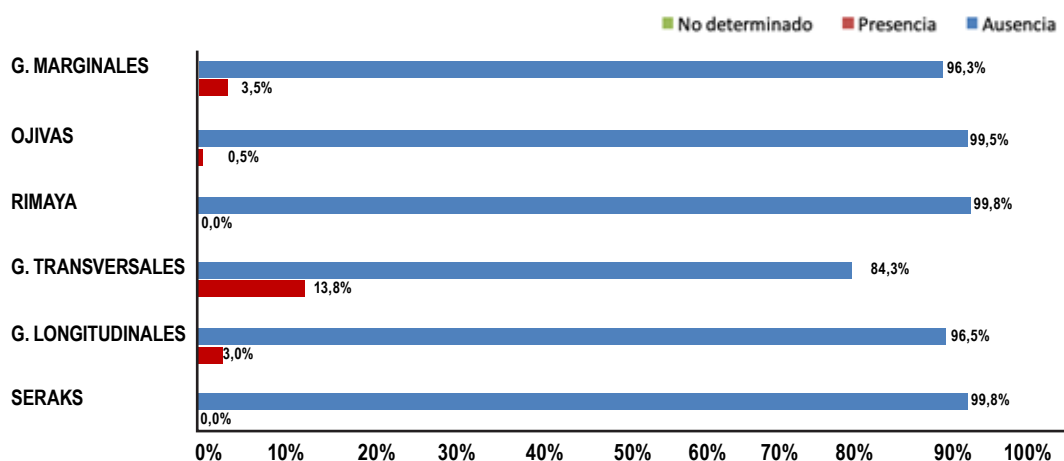


Figura 3. Presencia y ausencia de signos de flujo del intervalo n° I. Fuente: Elaboración propia.

Presencia/ausencia de signos de flujo de glaciaretos de 5 a 10 Ha.

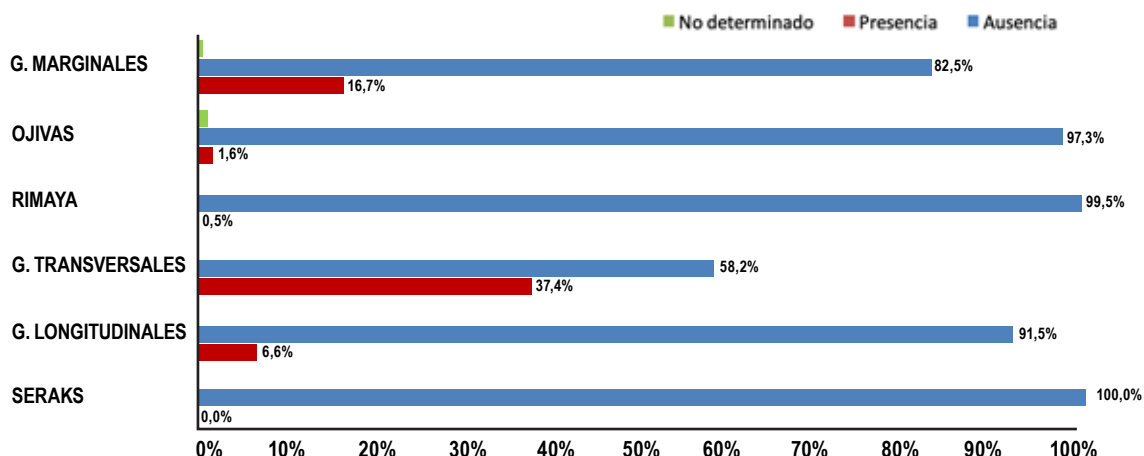


Figura 4. Presencia y ausencia de signos de flujo del intervalo n° II. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, este valor disminuye un poco en el intervalo n° V, alcanzando un total de 24,3% los que presentan estas características (Figura 2).

Siguiendo en específico en la división de los glaciaretos según intervalos de tamaño. En lo que corresponde al primer intervalo de tamaño, de 1 a 5 hectáreas de superficie, se puede observar la ausencia de morfologías que puedan indicar movimiento. Aun así, los signos de flujo que se encuentran con mayor

porcentaje de ocurrencia coinciden con los tres tipos de grietas, siendo la primera la grieta transversal (13,8%), seguida de la marginal y la longitudinal, con porcentajes del 3,5% y 3% respectivamente (Figura 3).

En lo que respecta al segundo intervalo de tamaño (5 a 10 hectáreas), esta muestra, al igual que en el intervalo n° I, una ausencia de morfologías que indican flujo. Sin embargo, el signo de flujo con mayor porcentaje sigue siendo la grieta transversal

Presencia/ausencia de signos de flujo de glaciaretos de 10 a 15 há.

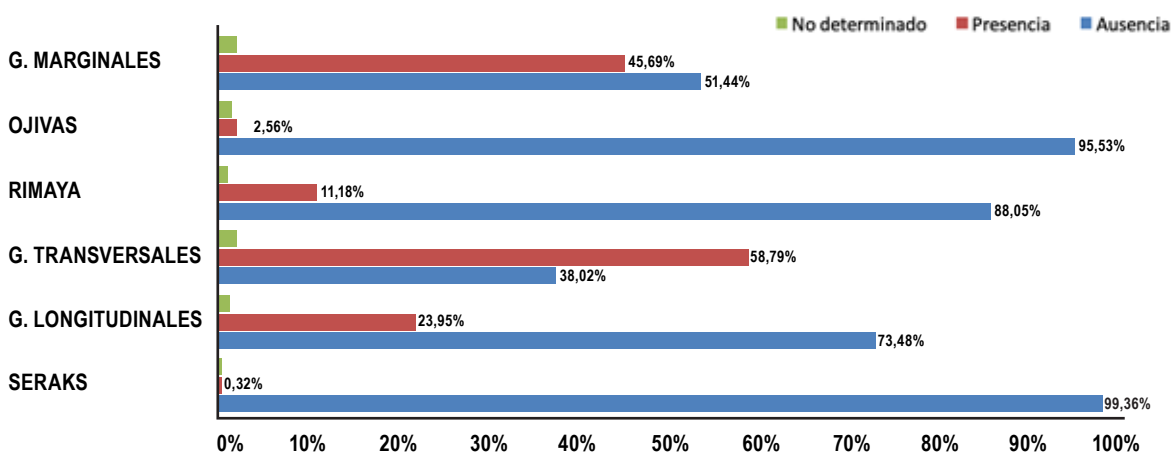


Figura 5. Presencia y ausencia de signos de flujo del intervalo n° III. Fuente: Elaboración propia.

con un 37,4% de presencia, seguido de las grietas marginales (16,7%) y las grietas longitudinales (6,6%). Se destaca que los seracs no fueron evidenciados en ningún glaciar (Figura 4).

En el intervalo n° III, correspondiente a glaciaretos con tamaño de 10 a 15 hectáreas, y siendo un total de 313 glaciaretos analizados, se puede divisar que, el signo de flujo con mayor presencia es la grieta transversal, con un total del 59% de los 313 glaciaretos (184 glaciaretos). Viendo también, que el segundo signo de flujo con mayor preponderancia corresponde a la grieta marginal con el 46% de los glaciaretos y el tercero siendo la grieta longitudinal con un 16,7% de presencia. Mientras que el signo de seracs, presenta un valor muy cercano al 0% (Figura 5).

Por otro lado, en el intervalo n° IV, correspondiente a glaciaretos con tamaño entre 15 a 20 hectáreas, con un total de 251 glaciares analizados, se observa que, al igual que los intervalos anteriores, el signo de flujo que muestra mayor presencia es la grieta transversal, pero se percibe un aumento

importante respecto al intervalo anterior, dado que, el 78% de los 251 glaciaretos observados contiene este signo de flujo, a diferencia del 58% observado en el intervalo n° III. Esto también se observa en el valor obtenido por las grietas marginales, elevándose al 68% del total de glaciaretos de este intervalo, vislumbrándose entonces en este intervalo un posible punto de quiebre entre los intervalos con ausencia de señales de flujo y los intervalos con presencia de señales de flujo (Figura 6).

Por último, en el intervalo n° V, correspondiente a los glaciaretos con tamaño de 20 a 25 hectáreas, al igual que los primeros 4 intervalos, la grieta transversal es el signo de flujo que más se repite, llegando a tener un valor del 85% aproximadamente, superando en 7% al intervalo n° IV y en 27% al intervalo n° III. La grieta marginal presenta un aumento de valor en comparación al intervalo n° III, y casi un mismo valor con el intervalo n° IV, llegando a exhibir un 66%. El seracs, por otro lado, se incrementa respecto a ambos intervalos anteriores, llegando a estar cerca de un 6% de los glaciaretos (Figura 7).

Presencia/ausencia de signos de flujo de glaciaretos de 15 a 20 há.

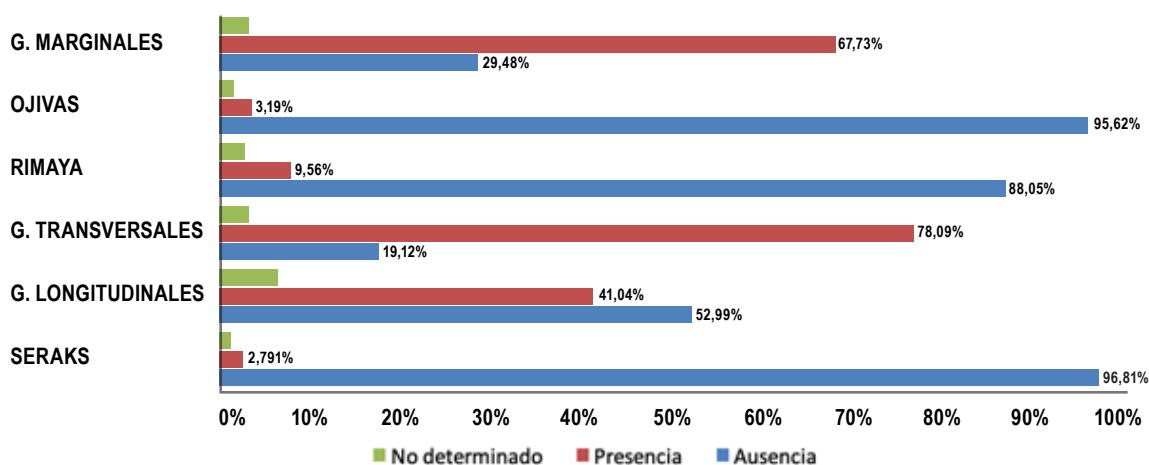


Figura 6. Presencia y ausencia de signos de flujo del intervalo n° IV. Fuente: Elaboración propia.

Presencia/ausencia de signos de flujo de glaciaretos de 20 a 25 há.

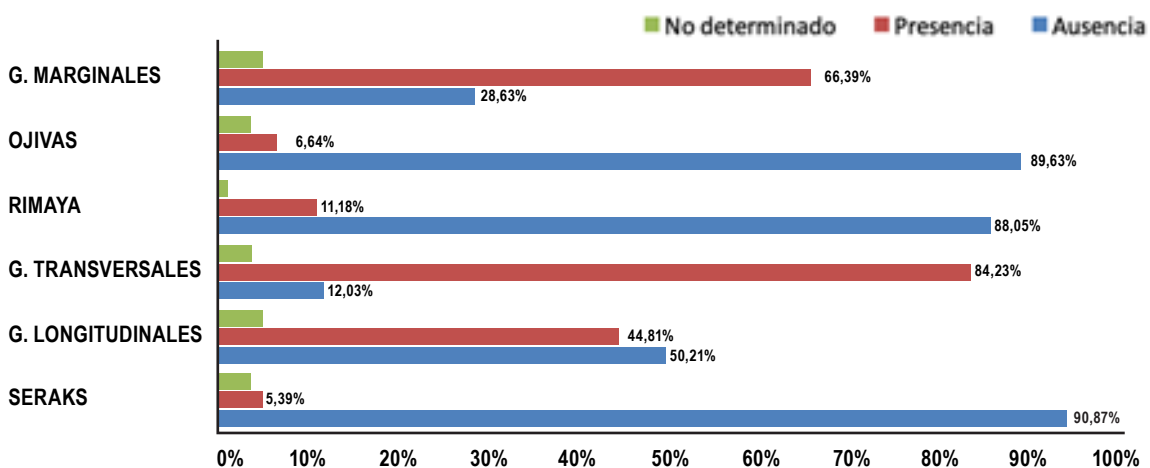


Figura 7. Presencia y ausencia de signos de flujo del intervalo n° V. Fuente: Elaboración propia.

Dentro de lo que se ha visto a lo largo de todos los intervalos de tamaño, se pudo definir que las morfologías más presentes dentro de los glaciares fueron los tres tipos de grietas, correspondientes a transversal, longitudinal, y marginal. Es por esto, que en la Figura 8 se aprecia cómo la presencia de estas va aumentando en relación con el incremento de área de los glaciares, sólo saliendo de la norma la grieta marginal entre el intervalo IV y V, con un 67,7% y 66,4% de presencia respectivamente.

Del mismo modo, se observa que la grieta transversal en todos los intervalos de tamaño se posiciona como el signo de flujo con mayor presencia, seguida de la grieta marginal. Se puede notar con mayor claridad el descenso presente en la grieta

marginal entre el intervalo n° IV y V, pasando de un 68% a un 66%, hecho que no se encuentra en ninguna otra grieta y en ningún otro intervalo (Figura 8).

En términos de cálculo de espesor, llevado a cabo a través de la fórmula de Chen & Omura (1990, en donde, de manera lógica, los menores espesores corresponden al intervalo n° I, y fueron aumentando hacia los glaciaretos del intervalo n° V, puesto que, esta fórmula es proporcional al área de los glaciares. Ahora bien, según menciona Marangunic (2019), todo glaciar con espesor mayor a 11 metros presentaría movimiento y deformación. Por lo tanto, los rangos de tamaño III, IV y V en teoría, son glaciaretos que sí presentarían movimiento. De modo contrario, se encuentra el intervalo

Tabla 3: Estadística de espesor de glaciaretos por rangos de tamaño.

Datos↓/Rango→	I	II	III	IV	V
Mínimo (m)	2,56	9,79	12,53	14,48	16,05
Máximo (m)	9,75	12,52	14,47	16,04	17,37
Promedio (m)	5,91	10,99	13,49	15,22	16,72
Mediana (m)	5,8	10,95	13,44	15,21	16,72

Fuente: Elaboración propia.

n° I y II, el cual muestra un promedio de 5,91 y 10,9 metros de espesor respectivamente (Tabla 3).

Pasando al cálculo de estrés, se puede evidenciar que la tensión va en aumento a medida que aumenta también el intervalo de tamaño, viéndose que el intervalo n° V presenta mucho mayor presión. Cabe destacar que la fórmula ocupada es proporcional al espesor del glaciar, y por lo tanto, del área. Por otra parte, en una división general sobre el cálculo de tensión, en el cual el umbral es >100 kpa, se observa qué, en el intervalo n° I ningún glaciar se posiciona por encima de los 100 kpa, mientras que el 9% del intervalo n° II se encuentra arriba de este umbral, y el 22% en el intervalo n° III. Este número comienza a aumentar, ya que en el intervalo de tamaño n° IV y V, el 49% y el 58% respectivamente de los glaciares,

Tabla 4: Umbral de presión por rangos de tamaños de glaciares

Rango↓/División→	Umbral > 100 kpa
I	0%
II	9%
III	22%
IV	49%
V	58%

Fuente: Elaboración propia.

presenta una tensión mayor a 100 kpa (Tabla 4).

Por otro lado, en la observación de un total de 224 glaciares con tamaño entre 25 a 30 ha, se determinó que, al igual que en los cinco intervalos de tamaño anteriores, las grietas transversales y las grietas marginales muestran mayor frecuencia de presencia, llegando a un total de 94% y 75% respectivamente (Figura 9).

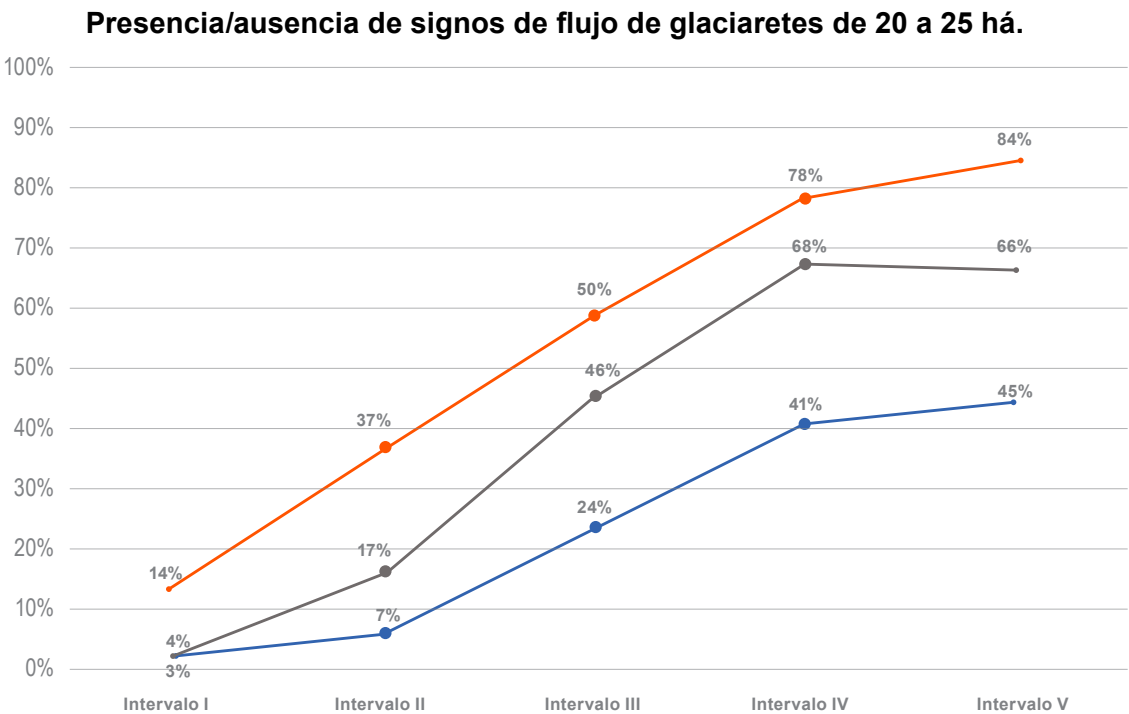


Figura 8. Comparación de grietas transversales, marginales y longitudinales por intervalos de tamaño.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5: Presencia y ausencia de signos de flujo del intervalo n° VI

Tipo de grieta↓/Rango→	I	II	III	IV	V
Grietas transversales	13,8%	37,4%	58,8%	78%	84,2% 94%
Grietas Marginales	3,5%	16,7%	45,7%	67,7%	66,4% 75%
Grietas Longitudinales	3%	6,6%	24%	41%	44,8% 55,1%

Fuente: Elaboración propia.

Presencia/ausencia de signos de flujo de glaciaretos de 25 a 30 há.

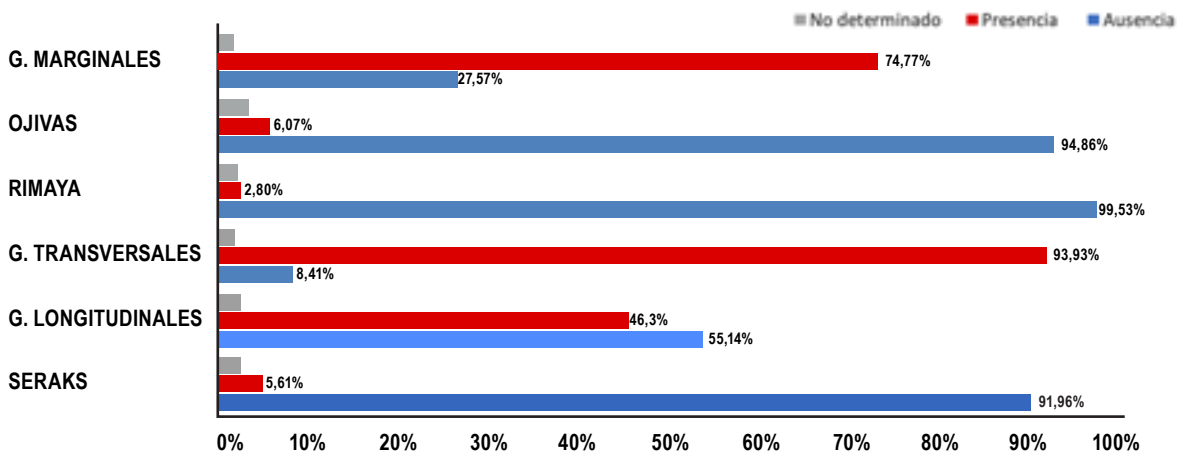


Figura 9. Presencia y ausencia de signos de flujo del intervalo n° VI. Fuente: Elaboración propia.

Al comparar estos datos con los vistos en el global de glaciaretos analizados, se puede notar un alza en los dos signos de flujo que más se presentan, correspondientes a la grieta transversal y a la grieta marginal., dado que la grieta transversal se observa en el 49,3% de los 1.573 glaciaretos observados, mientras que las grietas marginales sólo en un 34,8% de estos mismos.

Ahora bien, si estos dos signos de flujo son comparados con las estadísticas por separado de cada uno de los intervalos de tamaño, se divisa un aumento de presencia de ambas grietas en el rango de tamaño de 25 a 30 ha, como se puede observar en la Tabla siguiente (Tabla 5).

DISCUSIÓN

Chile es un país con una alta diversidad de glaciares. Por esta razón, es importante que su clasificación y estudio sea la más correcta y adecuada. Los glaciares que presentan tamaños muy pequeños son los más vulnerables dentro del contexto actual de cambio climático, y si bien, no representan mucha superficie glaciaria (3,8% del total nacional), si representan el mayor porcentaje del número de cuerpos de hielo (69,6% del total nacional). Es por esto, que lo visto en los 1.573 glaciaretos analizados es bastante interesante, dado que, se observó que efectivamente algunos de estos cuerpos de hielo sí presentaban

rasgos de movimiento dentro de su masa.

Se muestra de manera obvia que el intervalo de tamaño n° I y II concentran un porcentaje muy bajo de actividad de flujo, dado de su limitado tamaño, y estos números sólo aumentan relativamente poco hacia el intervalo de tamaño n° III, incrementándose de manera más importante en los intervalos de tamaño n° IV y V, en los cuales hay varias morfologías de flujo que superan los 60% de presencia. Cabe recalcar, que los signos de flujo que mayoritariamente se observan dentro de los cuerpos de hielo son las grietas, correspondientes a las transversales, marginales y longitudinales.

Se llegó a la conclusión de que el intervalo n° V fue donde hubo el más alto porcentaje de glaciares con algún signo de flujo, lo que concuerda con la teoría acerca de la dinámica de movimiento de un glaciar, puesto que, entre mayor sea la masa y el espesor, mayor presión se ejercerá, llevando a deformarse y moverse.

Pasando ahora a un cálculo más teórico de la dinámica de flujo de los glaciares, a través de fórmulas matemáticas realizadas desde una serie de estudios y modelos respecto al funcionamiento de los glaciares, es que, se concluye que los espesores obtenidos en los últimos tres intervalos de tamaño son mayores a los umbrales definidos por la teoría como punto de quiebre entre el movimiento y la inmovilidad, lo que indica que estos cuerpos de hielo tienen el volumen necesario para presentar flujos.

Sin embargo, agregando factores tales como, densidad, gravedad, superficie y pendiente en el cálculo para obtener la presión que estos cuerpos de hielo presentan, es que se difiere un poco con el

resultado de las observaciones y cálculos de espesor. Se observa entonces, que desde el intervalo IV al menos la mitad de los glaciares analizados superan los 100 kpa, aumentando hacia el intervalo V donde más de la mitad de los glaciares se encuentran por sobre este umbral.

En la comparación generada con los glaciares de tamaño de 25 a 30 hectáreas, se divisa un aumento en la cantidad de signos de flujo presentes en comparación con los tres intervalos menores. Relacionando este intervalo sólo con los porcentajes de frecuencia de las grietas transversales y marginales, se vislumbra que la gran mayoría de los glaciares de este intervalo presentan ambas grietas, un 94% y 75% respectivamente, porcentajes muy similares a lo visto en el intervalo n° V, contrario a lo observado en comparación a los intervalos del III hacia abajo, donde las diferencias en los números son mucho mayores.

El intervalo n° III, se posiciona como un punto de transición entre glaciares con flujo y sin flujo. Este intervalo si bien contempla un aumento significativo en los porcentajes de presencia de los signos de flujo, sólo en el caso de las grietas transversales supera el 50%. Y si bien, los 313 glaciares observados en este intervalo superan en teoría los 11 metros de espesor, sólo el 22% de ellos supera los 100kpa, lo cual indica un bajo porcentaje para asumir el movimiento en los glaciares de 10 a 15 hectáreas.

A diferencia de los intervalos anteriores, se pudo evidenciar un aumento importante de presencia de signos de flujo en los intervalos de tamaño n° IV y V. En estos, los porcentajes de presencia de flujos de las grietas transversales y marginales superan

el 65%, llegando incluso a porcentajes de presencia de 84% y 75%, como es el caso de las grietas transversales en ambos intervalos. En lo que respecta a su cálculo de espesor, todos estos superan los 11 metros, donde el mínimo de espesor del intervalo n° IV supera los 14 m, por lo que teóricamente estos sí presentarían flujo. En el caso del cálculo de presión, ambos se encuentran cercanos al 50%, lo que indica que, en promedio, la mitad de estos glaciares lograrían moverse, dada la presión de cizallamiento que estos presentan.

CONCLUSIONES

Por lo tanto, en vista de los resultados, se llega a la conclusión que los glaciaretes con tamaño superior a 15 hectáreas pueden ser potenciales glaciares con condiciones de movimiento, esto debido a que, en su mayoría presentan al menos un signo de flujo o más, en su totalidad poseen el espesor necesario, y en su mayoría disponen de la tensión necesaria para esto. En consecuencia, se propone modificar la categoría de glaciarete a "cuerpos de hielo menores de 15 ha casi sin señales de flujo visible en superficie", y los mayores o iguales a 15 ha clasificarlos según corresponda su morfología.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ayala, Á., Farías-Barahona, D., Huss, M., Pelli-
ccioti, F., McPhee, J. y Farinotti, D. (2020).
Glacier runoff variations since 1955 in the
Maipo River basin, in the semiarid Andes of
central Chile. *The Cryosphere*, 14(6), 2005-
2027. <https://doi.org/10.5194/tc-14-2005-2020>
- Cancer, L., Lampre, F., y Ollero, A. (2001). Glaciares
actuales del Pirineo español: Catálogo de
masas aproximación hidrológica. *Treballs de
la Societat Catalana de Geografia*, 52, 2001
(165-193). [https://ekoizpen-zientifikoa.ehu.
eus/ocumentos/5eebf26f29995209f4263c19
?lang=es](https://ekoizpen-zientifikoa.ehu.eus/ocumentos/5eebf26f29995209f4263c19?lang=es)
- Casassa, G., Apey, A., Bustamante, M., Marangunic,
C., Salazar, C. y Soza, D. (2015). Contribución
hídrica de glaciares en el estero Yerba Loca
y su extrapolación a la cuenca del río Maipo.
Área Temática 3: Geología del Cuaternario y
Cambio Climático. Sesión Temática 10: Efectos
Directos e Indirectos del Cambio Climático.
XIV Congreso Geológico Chileno, La Serena,
Chile, 4 al 8 de octubre de 2015. [https://
repositorio.sernageomin.cl/items/4109c8ba-
280a-46b4-9fa9-fed816b7ac55](https://repositorio.sernageomin.cl/items/4109c8ba-280a-46b4-9fa9-fed816b7ac55)
- Castillo, Y. (2015). Caracterización de la
hidrología glaciar de la cuenca del río
Maipo mediante la implementación de un
modelo glaciohidrológico semi-distribuido
físicamente basado. [Tesis]. Universidad de
Chile. [https://repositorio.uchile.cl/bitstream/
handle/2250/132835/Caracterizacion-de-
la-hidrologia-glaciar-de-la-cuenca-del-rio-
maipo-mediante.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/132835/Caracterizacion-de-la-hidrologia-glaciar-de-la-cuenca-del-rio-maipo-mediante.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Chen, J. y Ohmura, A. (1990). Estimation of Alpine
glacier water resources and their change
since the 1870s. Department of Geography,
Swiss Federal Institute of Technology.
[https://www.researchgate.net/publica
tion/
241663882_Estimation_of_Alpine_Gla
cier_
Water_Resources_and_their_Change_Since_
the_1870s](https://www.researchgate.net/publication/241663882_Estimation_of_Alpine_Glacier_Water_Resources_and_their_Change_Since_the_1870s)
- Cogley, J.G., Hock, R., Rasmussen, L.A., Arendt,
A.A., Bauder, A., Jansson, P., Braithwaite R.
J., Kaser, G., Möller, M., Nicholson, L y Zemp,
M. (2011). Glossary of Glacier Mass Balance
and Related Terms, 86(2), [https://wgms.ch/
downloads/Cogley_etal_2011.pdf](https://wgms.ch/downloads/Cogley_etal_2011.pdf)
- Cuffey, K., y Paterson, W. (2010). *The Physics of
Glaciers* (4ta ed.). Elsevier.
- Dirección General de Aguas. (2009). Estrategia
nacional de glaciares, fundamentos. Docu-
mentos DGA: [http://documentos.dga.cl/GLA
5194v1.pdf](http://documentos.dga.cl/GLA5194v1.pdf)
- Casassa, G., Espinoza, A., Segovia, A. y Huenante,
J. (2022). Metodología del inventario público
de glaciares, sdt n°447. Ministerio de Obras
Públicas, Dirección General de Aguas Unidad
de Glaciología y Nieves.
- Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, M.
(2010). Metodología de la investigación (5ª
ed.). Interamericana Editores.
- Herrera, J. y Segovia, A. (2019). Ley de protección
de glaciares: el devenir de un conflicto
socioambiental. *Investigaciones Geográficas
de Chile: Una Mirada desde el Sur* (58), 119-135.
<https://doi.org/10.5354/0719-5370.2019.52214>.
- Hooke, R. (2005). *Principles of Glacier Mechanics*
(2ª ed.). Cambridge University Press. [https://
doi.org/10.1017/CBO9780511614231](https://doi.org/10.1017/CBO9780511614231)
- Leight, J., Stokes, C., Carr, R., Evans, I., Andreassen,
L., y Evans, D. (2019). Identifying and mapping
very small (<0.5 km²) mountain glaciers on
coarse to high-resolution imagery. *Journal
of Glaciology*, 65(254), 873-888. [https://doi.
org/10.1017/jog.2019.50](https://doi.org/10.1017/jog.2019.50)
- Lliboutry, L. (1956). *Nieves y Glaciares de Chile:
fundamentos de glaciología*. Ediciones de la
Universidad de Chile. [https://libros.uchile.
cl/1339](https://libros.uchile.cl/1339)
- Müller, F., Caflish, T., y Müller, G. (1977).
*Instructions for Compilation and Assemblage
of Data for a World Glacier Inventory*.
Department of Geography. Swiss Federal
Institute. [https://www.wgms.ch/downloads/
Mueller_etal_UNESCO_1977.pdf](https://www.wgms.ch/downloads/Mueller_etal_UNESCO_1977.pdf)

- Marangunic, C. (2019). Glaciares y los eco sistemas de montaña: las importantes tareas pendientes. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*, 1, <https://doi.org/10.36580/rgem.i1.11-19>
- Peña, H. y Nazarala, B. (1987). Snowmelt runoff simulation model of a central Chile Andean basin with relevant orographic effects, Large Scale Effects of Seasonal Snow Cover. *International Association of Hydrological Sciences*, 166, 161-172. https://glaciologia.cl/wp-content/uploads/2020/08/pena_nazarala.pdf
- Pritchard, H. (2019). Asia's shrinking glaciers protect large populations from drought stress. *Nature*, 569, 649-654. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1240-1>. <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1240-1>
- Rau, F., Mauz, F., Vogt, S., Singh Khalsa, S. J., y Raup, B. (2005). Illustrated GLIMS Glacier Classification Manual. GLIMS Regional Center 'Antarctic Peninsula'. https://www.glims.org/MapsAndDocs/assets/GLIMS_Glacier-Classification-Manual_V1_2005-02-10.pdf
- Segovia, A. y Videla, Y. (2017). Caracterización glaciológica de Chile. *Revista Investigaciones Geográficas de Chile*. (53), 3-24. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2017.41739>.
- Singh, V. P., Singh, P., y Haritashya, U. (2011). Encyclopedia of snow, ice and glaciers. Geology Faculty Publications. https://ecommons.udayton.edu/geo_fac_pub/7/
- WGI. 2018. National Snow and Ice Data Center. World Glacier Inventory, Version 1. 34 p. <https://nsidc.org/data/g01130>
- World Glacier Monitoring Service. (2020). A-General Information. http://wgms.ch/downloads/WGMS_AttributeDescription.ume ntos/5eebf26f29995209f4263c19?lang=es
- Casassa, G., Apey, A., Bustamante, M., Marangunic, C., Salazar, C. y Soza, D. (2015). Contribución hídrica de glaciares en el estero Yerba Loca y su extrapolación a la cuenca del río Maipo. Área Temática 3: Geología del Cuaternario y Cambio Climático. Sesión Temática 10: Efectos Directos e Indirectos del Cambio Climático. XIV Congreso Geológico Chileno, La Serena, Chile, 4 al 8 de octubre de 2015. <https://repositorio.sernageomin.cl/items/4109c8ba-280a-46b4-9fa9-fed816b7ac55>
- Castillo, Y. (2015). Caracterización de la hidrología glaciar de la cuenca del río Maipo mediante la implementación de un modelo glaciohidrológico semi-distribuido físicamente basado. [Tesis de magíster]. Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/132835/Caracterizacion-de-la-hidrologia-glaciar-de-la-cuenca-del-rio-maipo-mediante....pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Chen, J. y Ohmura, A. (1990). Estimation of Alpine glacier water resources and their change since the 1870s. Department of Geography, Swiss Federal Institute of Technology. https://www.researchgate.net/publication/241663882_Estimation_of_Alpine_Glacier_Water_Resources_and_theirChange_Since_the_1870s
- Cogley, J.G., Hock, R., Rasmussen, L.A., Arendt, A.A., Bauder, A., Jansson, P., Braithwaite R. J., Kaser, G., Möller, M., Nicholson, L y Zemp, M. (2011). Glossary of Glacier Mass Balance and Related Terms, 86(2), https://wgms.ch/downloads/Cogley_et al_2011.pdf
- Cuffey, K., y Paterson, W. (2010). The Physics of Glaciers (4ta ed.). Elsevier.
- Dirección General de Aguas. (2009). Estrategia nacional de glaciares, fundamentos. Documentos DGA: <http://documentos.dga.cl/GLA5194v1.pdf>
- Casassa, G., Espinoza, A., Segovia, A. y Huenante, J. (2022). Metodología del inventario público de glaciares, sdt n°447. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas Unidad de Glaciología y Nieves.

- Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, M. (2010). Metodología de la investigación (5ª ed.). Interamericana Editores.
- Herrera, J. y Segovia, A. (2019). Ley de protección de glaciares: el devenir de un conflicto socioambiental. *Investigaciones Geográficas de Chile: Una Mirada desde el Sur* (58), 119-135. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2019.52214>.
- Hooke, R. (2005). *Principles of Glacier Mechanics* (2ª ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511614231>
- Leight, J., Stokes, C., Carr, R., Evans, I., Andreassen, L., y Evans, D. (2019). Identifying and mapping very small (<0.5 km²) mountain glaciers on coarse to high-resolution imagery. *Journal of Glaciology*, 65(254), 873-888. <https://doi.org/10.1017/jog.2019.50>
- Lliboutry, L. (1956). Nieves y Glaciares de Chile: fundamentos de glaciología. Ediciones de la Universidad de Chile. <https://libros.uchile.cl/1339>
- Müller, F., Caflish, T., y Müller, G. (1977). Instructions for Compilation and Assemblage of Data for a World Glacier Inventory. Department of Geography. Swiss Federal Institute. https://www.wgms.ch/downloads/Mueller_et_al_UNESCO_1977.pdf
- Marangunic, C. (2019). Glaciares y los ecosistemas de montaña: las importantes tareas pendientes. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*, 1, <https://doi.org/10.36580/rgem.i1.11-19>
- Peña, H. y Nazarala, B. (1987). Snowmelt runoff simulation model of a central Chile Andean basin with relevant orographic effects, Large Scale Effects of Seasonal Snow Cover. *International Association of Hydrological Sciences*, 166, 161-172. https://glaciologia.cl/wp-content/uploads/2020/08/pena_nazarala.pdf
- Pritchard, H. (2019). Asia's shrinking glaciers protect large populations from drought stress. *Nature*, 569, 649-654. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1240-1>. <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1240-1>
- Rau, F., Mauz, F., Vogt, S., Singh Khalsa, S. J., y Raup, B. (2005). Illustrated GLIMS Glacier Classification Manual. GLIMS Regional Center 'Antarctic Peninsula'. https://www.glims.org/MapsAndDocs/assets/GLIMS_Glacier-Classification-Manual_V1_2005-02-10.pdf
- Segovia, A. y Videla, Y. (2017). Caracterización glaciológica de Chile. *Revista Investigaciones Geográficas de Chile*. (53), 3-24. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2017.41739>.
- Singh, V. P., Singh, P., y Haritashya, U. (2011). Encyclopedia of snow, ice and glaciers. Geology Faculty Publications. https://ecommons.udayton.edu/geo_fac_pub/7/
- WGI. 2018. National Snow and Ice Data Center. World Glacier Inventory, Version 1. 34. <https://nsidc.org/data/g01130>
- World Glacier Monitoring Service. (2020). A- General Information. http://wgms.ch/downloads/WGMS_AttributeDescription.pdf