

Caracterización glaciológica de Chile

Glaciological characterization of Chile

Alexis Segovia Rocha¹, Yohann Videla Giering²

Resumen

Se realizó una caracterización glaciológica de Chile, la cual incluyó la determinación del número, superficie y el equivalente en agua contenida en los glaciares a nivel nacional (Incluidos los glaciares rocosos y campos de hielo patagónicos). La caracterización glaciológica de Chile se realizó mediante datos extraídos del Inventario Nacional de Glaciares de la Dirección General de Aguas (DGA) con actualización al año 2014, generación de información en base a procesamiento del inventario de glaciares e información bibliográfica. Dentro de los resultados, se pudo establecer que Chile posee un total estimado de 24.114 glaciares con una superficie de 23.641 km². No obstante, esta cantidad de hielo se manifiesta con grandes diferencias regionales a lo largo del país, aumentando de norte a sur. El equivalente en agua contenida de todos los cuerpos de hielo a nivel nacional corresponde a un total estimado de 3.175 km³.

Palabras clave: glaciar, Chile, zonas glaciológicas, equivalente agua.

Abstract

An analysis of Chilean glaciers was carried out which included determining the number, surface and water content of glaciers across the country (including rock glaciers and Patagonian ice fields). Chile's glaciological depiction was performed with data obtained from the National Inventory of Glaciers of the General Directorate of Water (Dirección General de Aguas - DGA) and bibliographic information. From the results, it was established that Chile has an estimated total of 24,114 glaciers with a surface of 23,641 km². Nevertheless, this surface of ice has great regional differences across the country, covering more surface area in the south. The equivalent water content of all ice bodies in the country has been estimated at 3,175 km³.

Keywords: glacier, Chile, glaciological zones, water equivalent.

Recibido el 19 de junio de 2016, aceptado el 08 de octubre de 2016.

1 Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile. Av. Santa Rosa 11315, La Pintana, Santiago. Email: alexisegov@ug.uchile.cl
2 Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Introducción

Los glaciares constituyen sistemas hidrológicos complejos (Röthlisberger & Lang, 1987; Walder & Driedger, 1995; Jansson, Hock, & Schneider, 2003; Hock, 2005). La mayoría de los glaciares alrededor del mundo están retrocediendo cada vez a una mayor tasa, esto ha sido documentado por observaciones locales o terrestres, (Kaser, Großhauser, & Marzeion, 2010; Bauder, Funk & Huss, 2007; Huss & Bauder, 2009; Zemp, Hoelzle & Haeberli, 2009), con técnicas de teledetección (Paul, Huggel & Kääb, 2004; Bolch, Menounos & Wheate, 2010; Kääb, 2008) y modelado (por ejemplo Radic & Hock, 2006; Huss, Farinotti, Bauder, & Funk, 2008; Immerzeel, Van Beek, & Bierkens, 2010; Immerzeel, Pellicciotti, & Bierkens, 2013). En térmicos ecosistémicos, los glaciares juegan un rol esencial en la dinámica natural, especialmente en la continuidad del escurrimiento de los cursos de agua, por lo tanto también influyen en los ciclos ecológicos de los ecosistemas bajo su influencia, además de representar un bienestar general para la población, dado que estos cuerpos de hielo ofrecen variados servicios ecosistémicos tanto de provisión, de regulación y culturales, los cuales toman cada vez más relevancia debido a la merma ambiental acelerada que los glaciares han sufrido en las últimas décadas, presumiblemente debido a los cambios atmosféricos, como el aumento de las temperaturas y la baja en las precipitaciones (Segovia, 2015).

Chile es un país meridional, cuyo principal aporte hídrico en gran parte del territorio es basado en cuencas con dominio nivoglaciario, a su vez, el 63,8% (477.671 km²) del territorio continental corresponde a zonas de montaña (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, FAO, 2012), lo que hace de Chile un país montaño-dependiente en términos de provisión de agua.

Espacialmente tanto el clima como la geografía de Chile determinan una gran variabilidad estacional e interanual de lluvias y un bajo tiempo de residencia del agua en las cuencas debido a su morfología, en este sentido el principal aporte de agua proviene de las precipitaciones en forma de lluvia y nieve ocurridas en la cordillera (Videla & McPhee, 2015). Sin embargo en años en que la presencia de precipitaciones es escasa la relevancia del aporte glaciar llega a tal punto que Peña y Nazarala (1987), estimaron que en las cuencas de Chile central representaron alrededor del 67% del caudal medio mensual del año hidrológico 1968-1969 en la cuenca del Río Maipo. Pese a lo anterior, los sistemas de montaña en los Andes de Chile hasta mediados de la década de los 90' habían recibido relativamente poca atención, por esta razón, en los últimos años diferentes centros de investigación y oficinas gubernamentales han impulsado estudios de variaciones y cambios en los glaciares con el fin de saber de mejor forma cuáles serán sus efectos sobre los recursos hídricos en la región (Dirección General de Aguas & Centro de Estudios Científicos (DGA-CECs), 2009; 2011; Pellicciotti et al., 2008; Ragetti & Pellicciotti, 2012; Ohlanders, Rodríguez, & McPhee, 2013; Ragetti, Cortés, McPhee, & Pellicciotti, 2013) sumando también el reciente intento por comprender los procesos que ocurren a escala de cuenca, siendo los Andes centrales o semi-áridos, una de las sistemas más interesantes de estudiar, ya que combinan relativamente grandes glaciares con valles densamente poblados ricos en actividades de agricultura y la alimentación de grandes centros de población, incluyendo la ciudad capital de Santiago (Pellicciotti, Ragetti, Carenzo, & McPhee, 2013).

En base a lo anteriormente expuesto, es necesario realizar una caracterización glaciológica a nivel nacional que dé cuenta del número de glaciares, la superficie de hielo del país y una estimación de su equivalente en agua, así como determinar las diferencias regionales de cantidad de hielo,

a modo de establecer las particularidades geográficas del territorio nacional y su superficie englacada.

Materiales y métodos

Se utilizó la información provista por el inventario nacional de glaciares (con actualización al año 2014) de la Dirección General de Aguas con formato Shape para ser trabajado en un software de Sistema de Información Geográfico (SIG). Luego, en base al análisis y generación de nuevos datos se llegó a los resultados aquí expuestos.

La definición operativa de glaciar proveniente de The World Glaciers Inventory (Müller, Caffisch, & Müller, 1977) fue abordada según la Estrategia Nacional de Glaciares (2009) para realizar el inventario nacional de glaciares. De acuerdo a la normativa vigente, todo cuerpo de hielo que esté incluido en ese inventario se debe considerar como un glaciar y se define como: Toda superficie de hielo y nieve permanente generada sobre suelo, que sea visible por períodos de al menos 2 años y de un área igual o superior a 0,01 km² (una hectárea). O cualquier superficie rocosa con evidencia superficial de flujo viscoso, producto de un alto contenido de hielo actual o pasado en el subsuelo (DGA-CECs, 2009: 12).

Para la caracterización glaciológica nacional se utilizó las categorías de glaciares definidos en el inventario nacional de glaciares, cual incluye los siguientes tipos:

Glaciaretos: son pequeñas superficies de hielo que no poseen una clara delimitación de zonas de acumulación ni de ablación (DGA-CECs, 2009). Dentro del inventario nacional de glaciares corresponden a los que presentan una superficie en el rango entre 0,01 km² y 0,1 km².

Glaciares de montaña: Están localizados en las partes altas de la cordillera, con formas

variables, y donde la evacuación desde las zonas de acumulación se da por medio de una lengua glaciar pequeña (en comparación con un glaciar de valle) (Müller et al., 1977; DGA-CECs, 2009).

Glaciares de valle: Se caracterizan por tener una o más zonas de acumulación, ubicadas en subcuencas o circos, las cuales confluyen en un valle, el cual permite el flujo de hielo aguas abajo. No poseen lóbulo de derrame y su frente queda circunscrito al valle, (Benn & Evans, 1998; DGA-CECs, 2009). Un ejemplo es el glaciar Universidad en la Región de O'Higgins.

Glaciares Efluentes (Campo de Hielo): Son grandes superficies de hielo que exhiben una zona de acumulación compleja compuesta por una planicie en altura o plateau y zonas escarpadas que la rodean. Todo el hielo de estas zonas de alimentación es evacuado por medio de varias lenguas efluentes las cuales son controladas por la topografía subyacente (DGA-CECs, 2009). Ejemplos de estos glaciares son los efluentes del Campo de Hielo Norte y Campo de Hielo Sur. Para este trabajo, todos los glaciares efluentes corresponden a glaciares que fluyen desde los campos de hielo norte y sur.

Glaciares Rocosos: son cuerpos de hielo y rocas, que evidencian flujo, a tasas muy inferiores en comparación con glaciares descubiertos, debido a que la proporción de hielo, versus volumen total, puede ser inferior al 50%. Poseen una geometría en forma de lengua o lóbulo, cuya estructura interna está constituida por una mezcla de hielo estimada entre un 40% - 60%, (Azócar & Brenning, 2008; DGA-CECs, 2009).

Para el cálculo del equivalente en agua de los glaciares, se estimó el espesor medio de cada cuerpo de hielo, para esto se utilizó la fórmula de Chen & Ohmura (1990), la cual basa su estimación del espesor relacionando la superficie del glaciar. Este

método es un derivado estadístico validado en la observación de 67 glaciares de los Alpes, medidos con técnicas de radar de penetración o sondeos sísmicos:

$$Espesor_{(m)} = 28,5 \cdot (superficie_{(km^2)})^{0,357}$$

Se utilizó esta fórmula puesto que Ohmura (2009), recomienda la utilización de esta para los glaciares con áreas superiores a 100 km² y a su vez, en la comparación entre los resultados de las mediciones de 18 radioeco-sondajes realizadas por la DGA en glaciares de menos de 100 km², y la aplicación de las fórmulas de Chen & Ohmura (1990) y Bahr, Meier & Peckham (1997).

Luego de calcular el espesor medio de cada glaciar, se multiplicó por la superficie para obtener el volumen, para luego aplicar el factor de 0,9 gr/cm³ definida para la densidad del hielo en Paterson (1994).

Para los glaciares rocosos el tratamiento fue levemente diferente, debido que primero al volumen total del glaciar se le aplicó un factor de 0,5, equivalente al porcentaje de interfaz roca-hielo [$\rho_{rock-ice}$] que se estima que contienen los glaciares rocosos según Barsch (1996), para luego aplicar el factor de densidad [ρ_{ice}] del hielo puro de 0,9/gr cm³, misma metodología utilizada por Segovia, 2014.

De esta manera, el cálculo para la estimación del equivalente en agua (Ice Water Equivalent - IWE) se traduce de la siguiente manera:

Glaciares descubiertos:

$$IWE_{km^3} = (Área_{(km^2)} \cdot Espesor_{(km)}) \cdot 0,9(\rho_{ice})$$

Glaciares rocosos:

$$IWE_{km^3} = [(Área_{(km^2)} \cdot Espesor_{(km)}) \cdot 0,5(\rho_{rock-ice})] \cdot 0,9(\rho_{ice})$$

Resultados

Contexto glaciológico mundial

A nivel global existen muy pocas mediciones directas y las estimaciones son altamente inciertas Radić & Hock (2010). Los volúmenes medidos corresponden a un par de cientos de glaciares individuales (menos del 1% de los glaciares en el mundo) y se han obtenido a partir de datos de campo tales como mediciones de radar penetrante en el suelo y de pozo (por ejemplo, Bogorodsky, Bentley & Gudmandsen, 1985; Flowers & Clarke, 1999). Sin embargo los datos de las superficies de los glaciares suelen ser más abundantes gracias a las técnicas de percepción remota. Las estimaciones del área total de los glaciares de montaña y las capas de hielo (incluyendo las de Groenlandia y la Antártida, pero excluyendo las capas de hielo) varían entre 680 × 103 km² y 785 × 103 km². Hasta la fecha sólo el ~40% del área se encuentra inventariado en el Inventario Mundial de Glaciares (WGI) y disponible a través del Sistema Mundial de Monitoreo de Glaciares (WGMS, 1989) y el Centro Nacional de Datos sobre Nieve y Hielo (NSIDC, 1999), incluyendo datos sobre la ubicación geográfica del glaciar, longitud, orientación, elevación y tipo morfológico. Con el fin de ampliar la cobertura del WGI, se inició en 1995 la iniciativa de mediciones globales del hielo terrestre desde el espacio (GLIMS) para continuar la tarea de inventario con sensores espaciales Bishop et al. (2004). Si bien GLIMS ha hecho progresos sustanciales, su archivo contiene actualmente información sobre menos de un tercio del área englacada total. Por lo tanto, ambos inventarios son incompletos. Barry & Yew (2011) y Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC (2013) 0compilaron recientemente una versión más completa del WGI, llamado formato extendido (WGI-XF), que contiene registros de poco más de 131.000 glaciares, cubriendo aproximadamente la mitad del glaciar de montaña y el área de la capa de hielo.

Este WGI-XF provino de la asimilación de inventarios existentes, incluyendo una serie de inventarios regionales más antiguos que han sido documentados (WGMS, 1989) pero no incluidos en el WGI, y nuevos

inventarios en Canadá y la Sub-Antártica. De este modo la cantidad mundial de hielo estimada por macroregiones, se aproxima a lo siguiente (tabla 1):

Tabla 1

Distribución mundial de las masas de hielo. Fuente: Elaboración propia (2016)

Table 1

Global distribution of ice masses. Source: Own elaboration (2016)

Región	Superficie de hielo km ²	% de superficie de Hielo
África	10	0
Antártica	13.593.310	85,68%
Asia y Europa del Este	185.211	1,17%
Australasia (Nueva Zelanda)	1.160*	0,01%
Europa (oeste)	53.967	0,34%
Groenlandia	1.726.400	10,88%
Norte América	276.100	1,74%
América del Sur	29.361**	0,19%
Total Mundo	15.865.519	100%***

*Superficie actualizada según Barry & Gan (2011).

**Superficie actualizada según IPCC (2013).

***Porcentaje aproximado.

Fuente: Modificado de WGI (1989), en Hambrey & Alean (2004).

Lo anterior denota que las mayores masas de hielo se encuentran en la Antártica y Groenlandia, sumando entre ambas un 96,5% del total del hielo estimado a nivel mundial. No obstante lo anterior, las masas de hielo continentales que se encuentran en las montañas de Norteamérica, Sudamérica y Europa, juegan también un importante rol en el desarrollo de estas regiones.

Para el caso de Sudamérica, se estima un total de hielo de 29.361 km², con una representación del 0,19% a nivel mundial. Chile posee un total de 24.114 glaciares con una superficie de 23.641 km² (esto según el Inventario Nacional de Glaciares concluido

por la DGA el año 2014), lo que lo convertiría en el país con la mayor cobertura de hielo de la región, concentrando un 80,5% del total de superficie englaciada (figura 1).

Contexto glaciológico nacional

Los glaciares presentes en el territorio nacional se manifiestan con una amplia distribución latitudinal, abarcando casi la totalidad del largo del país desde los 17°38' de latitud sur en la Región de Arica y Parinacota, hasta los 55°27' de latitud sur en el Cabo de Hornos (Región de Magallanes y Antártica Chilena). La magnitud de tamaños de los glaciares también es amplia, variando

Distribución del porcentaje de superficie de hielo de Sudamérica

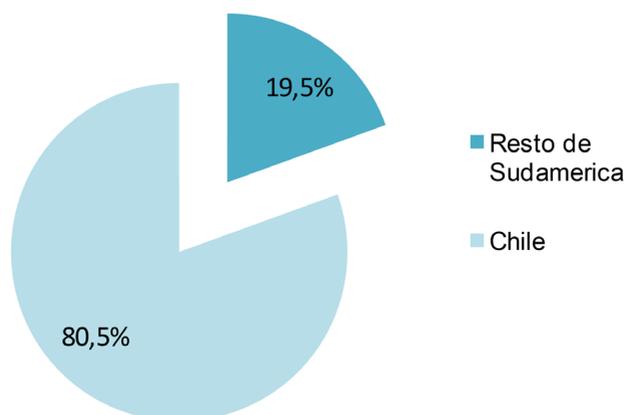


Figura 1. Distribución del porcentaje de superficie de hielo de Sudamérica. Fuente: Elaboración propia (2016)

Figure 1. Percentage distribution of ice surface in South America. Source: Own elaboration (2016)

entre los más pequeños con alrededor de 0,01 km², los cuales esencialmente corresponden a los denominados glaciaretos y glaciares rocosos, y por el contrario, los glaciares con tamaños por sobre los 100 km² de superficie, correspondientes casi en su totalidad a los afluentes de los campos de Hielo Norte y Sur en las regiones de Aysén y Magallanes. En este último contexto, se puede establecer que el glaciar más grande de todo el territorio nacional es el Pío XI con 1.241 km² y corresponde a un afluente de la fachada occidental del Campo de Hielo Sur. Pero la relevancia de este glaciar también radica en que es uno de los dos glaciares en Chile (junto al glaciar Garibaldi, ubicado en Cordillera Darwin en la Región de Magallanes) que se ha detectado que aún avanza, contrario a la marcada tendencia hacia el retroceso del resto de los cuerpos de hielo (Rivera, 1992; Rivera, Aravena & Casassa, 1997; Warren, Rivera & Post, 1997; Rivera & Casassa, 1999). Según Rivera, Casassa, Acuña & Lange (2000), el siglo pasado ya se detectaba una variación positiva para el glaciar Pío XI de 10,5 km en el periodo comprendido entre los años 1830-1925, asimismo, Wilson, Carrión & Rivera (2016), establece durante este siglo

un avance acumulativo del frente del glaciar Pío XI de 593 metros en su parte meridional y de 107 metros en su parte norte entre los años 1998 y 2014. Por último, un estudio de la DGA en el 2011 (variaciones recientes de glaciares en Chile, según principales zonas glaciológicas) estableció una variación frontal positiva (avance del frente del glaciar) de aproximadamente 11,2 km entre los años 1830 y 2009 (DGA-CECs, 2011). Por su parte, el mismo estudio de la DGA, logró establecer (luego del análisis de alrededor de 140 glaciares distribuidos a lo largo de todo el país) una tendencia generalizada de retroceso frontal y reducción de áreas glaciares (Bown, Rivera & Acuña, 2008). De igual forma recientes estudios han sido documentados por Rivera, Acuña, Casassa, & Bown (2002) y Bown et al. (2008), utilizando imágenes de teledetección (mapas de Instituto Geográfico Militar a partir de 1955 y 1997, Landsat TM; año 1987, Landsat ETM+; año 1999), Shuttle radar topography mission (SRTM) DEM para el año 2000 y dos imágenes ASTER; 2003 y 2006. Nicholson et al., (2009) extendió los documentos anteriores para tres glaciares en la región (Juncal Sur, Juncal Norte y Olivares

Gamma) y los compararon con los de tres glaciares en el Norte Chico (Tronquitos, Guanaco y Estrecho), de igual forma Cortés, Giroto & Margulis (2013), analizó con imágenes Landsat MMS, ETM+ y TM el área cubierta de nieve para circo Juncal Sur entre 1986-2013, aplicando una metodología de clasificación sub-píxel y desmezcla espectral, a fin de obtener áreas mínimas anuales de nieve/hielo y discretizar las variaciones existentes, dando como resultado en promedio una variación de 23 Km² de hielo en el período analizado, estas conclusiones destacan en forma particular los retrocesos de Chile central y de los glaciares sobre los volcanes de la zona centro-sur del país. Además, se logró establecer en la zona sur y austral que los glaciares con frentes sobre agua generan desprendimientos de témpanos, proceso conocido como Calving, lo que hace que puedan tener cambios frontales muy fuertes, aun así, se vincula la tendencia de retroceso y disminución generalizada de masa de hielo a los cambios de temperaturas y precipitaciones que afectan a Chile.

Clasificación morfológica de glaciares en Chile

Dentro de la clasificación morfológica de glaciares, según datos extraídos del inventario de glaciares de la DGA, de los 24.114 glaciares, la gran mayoría corresponde a la categoría denominada como glaciaretes con una representación del 52,2%. Sin embargo, esta categoría contiene a los glaciares más pequeños, por lo que si bien es cierto en número representan la gran mayoría a nivel nacional, en cuanto a la superficie acumulada su aporte es escaso (solo un 1,9) en comparación con otros tipos de glaciares como los efluentes de Campo de Hielo, los que representan el 58,6% del total de la superficie englaciada del país, debido al gran tamaño de cada uno de estos cuerpos de hielo, pese a que en número solo representan el 1,5% a nivel nacional. En conjunto el Campo de Hielo Norte más el Campo de Hielo Sur suman un total de 366 glaciares y una superficie total de 13.851 km² (tabla 2 y figura 2).

Tabla 2

Número de glaciares y superficie (km²) por clasificación morfológica a nivel nacional. Fuente: Elaboración propia (2016)

Table 2

Number of glaciers and surface (km²) for morphological classification at national level. Source: Own elaboration (2016)

Clasificación Morfológica	Nº de glaciares	Superficie km ²	% Nº glaciares	% Superficie de glaciares
Glaciarete	12.597	445,8	52,2%	1,9%
Glaciar de Montaña	8.019	6.617,9	33,3%	28,0%
Glaciar Rocoso	2.831	369,9	11,7%	1,6%
Efluente Campo de Hielo	366	13.851,1	1,5%	58,6%
Glaciar de Valle	301	2.356,7	1,2%	10,0%
Total	24.114	23.641,4	100%	100%*

*Porcentaje aproximado.

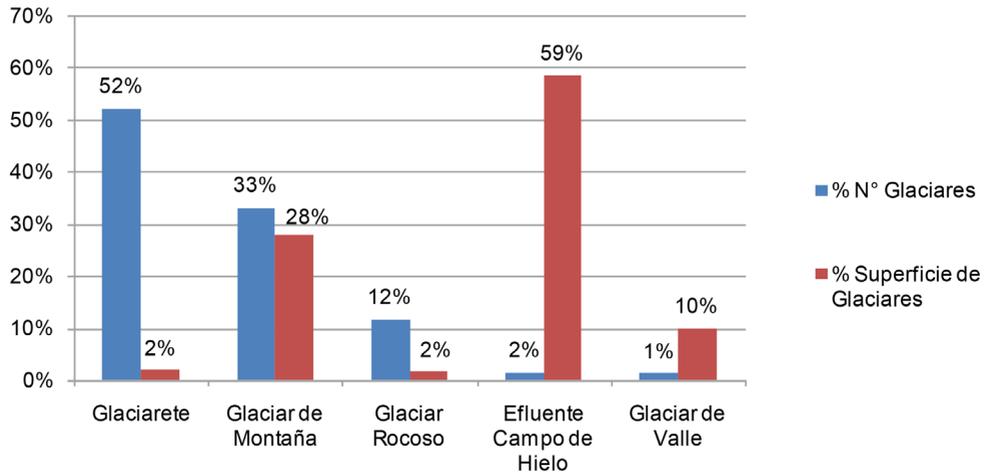


Figura 2. Número de glaciares y superficie (km²) por clasificación morfológica a nivel nacional.
Fuente: Elaboración propia (2016)

Figure 2. Number of glaciers and surface (km²) for morphological classification at national level.
Source: Own elaboration (2016)

Dentro de la división político administrativa de Chile (15 regiones), se pueden percibir grandes diferencias en cuanto al número de glaciares y a la superficie englacada presente en cada una de ellas, destacándose

una tendencia notoria hacia el incremento en cantidad de glaciares y superficie en las regiones de Chile central (Valparaíso y Metropolitana) y austral (Aysén y Magallanes) (tabla 3 y figura 3).

Tabla 3

Distribución de glaciares por división político administrativa. Fuente: Elaboración propia (2016)

Table 3

Glacier distribution by political administrative division. Source: Own elaboration (2016)

Región	N° de glaciares	Superficie glaciar (km ²)	Región	N° de glaciares	Superficie glaciar (km ²)
Arica y Parinacota	327	30,4	Maule	218	38,2
Tarapacá	91	6,4	Bío bío	194	39,8
Antofagasta	139	7,2	Araucanía	140	64,5
Atacama	749	87,9	Los Ríos	50	36,8
Coquimbo	836	48,3	Los Lagos	3.225	928,9
Valparaíso	715	135,8	Aysén	8.943	10.214,7
Metropolitana	999	388,3	Magallanes	6.805	11.321,9
O'Higgins	683	292,3	Total	24.114	23.641,4

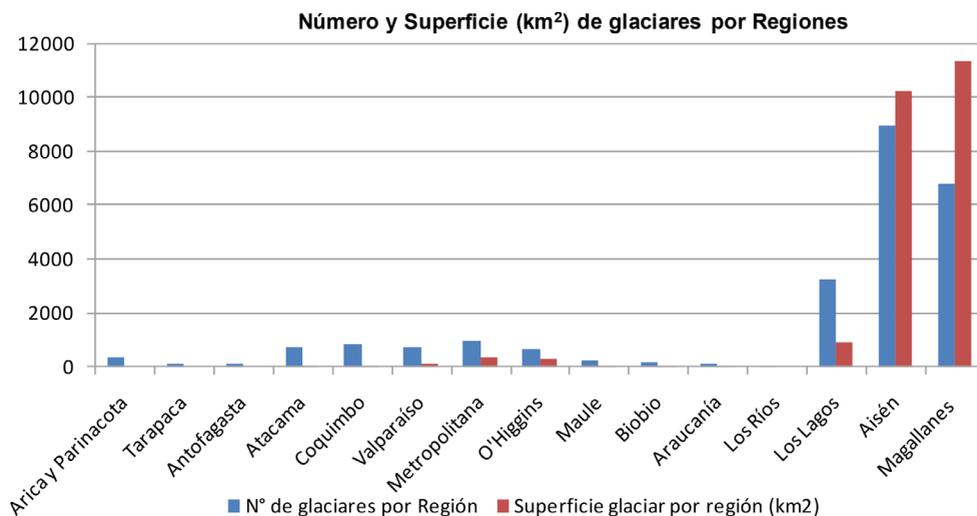


Figura 3. Distribución de glaciares por división político-administrativa. Fuente: Elaboración propia (2016)

Figure 3. Glacier distribution by political administrative division. Source: Own elaboration (2016)

Exposición y altitud de los glaciares chilenos

En cuanto a la exposición de los glaciares a nivel nacional, la gran mayoría de estos presenta una orientación sur-este (SE) con un total de 5.194 glaciares, lo que corresponde al 21,5% del total de glaciares,

sin embargo, la mayor cantidad de superficie englaciada corresponde a la orientación oeste (W) con 7.475 km², correspondiente al 31,6% del total de superficie de hielo en el país, esto último influenciado por el gran tamaño de los glaciares que fluyen hacia la fachada occidental de los campos de Hielo Norte y Sur (tabla 4 y figura 4).

Tabla 4

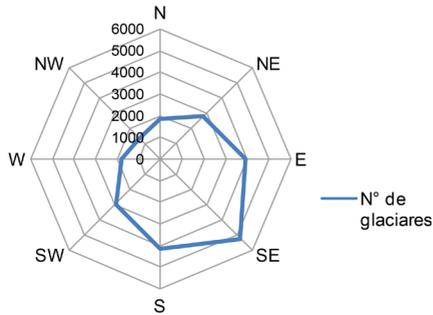
Número y superficie de glaciares clasificados por exposición. Fuente: Elaboración propia (2016)

Table 4

Number and surface of glaciers classified by exposure. Source: Own elaboration (2016)

Exposición	Nº de glaciares	Superficie (km ²)
N	1.883	2.134,5
NE	2.807	1.656,9
E	3.950	3.249,2
SE	5.194	3.153
S	4.125	1.742
SW	2.943	2.805,4
W	1.828	7.475,4
NW	1.384	1.425,1
Total	24.114	23.641,4

Exposición de glaciares a nivel nacional



Superficie (km²) de exposición de glaciares a nivel nacional

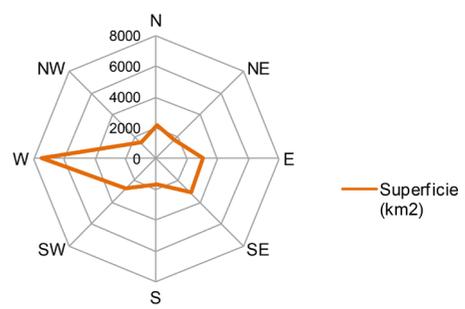


Figura 2. Número (izquierda) y superficie (derecha) de glaciares clasificados por exposición. Fuente: Elaboración propia (2016)

Figure 2. Number (left) and surface (right) of glaciers classified by exposure. Source: Own elaboration (2016)

En cuanto a la altitud sobre el nivel medio del mar de los glaciares a nivel nacional, aproximadamente el 57% de la superficie de hielo se ubica entre los 1.000 y los 2.000 m.s.n.m., muy similar a la tendencia que se aprecia en la frecuencia de glaciares por altitud media (figura 5). Las altitudes extremas van desde unos pocos metros sobre el nivel del mar (0-500 m.s.n.m.) en las regiones de Aysén y Magallanes donde algunos de los glaciares efluentes de las fachadas occidentales de los campos de Hielo Norte y Sur terminan con su frente

en los fiordos que se unen con el Océano Pacífico, como el caso de los glaciares San Rafael, San Quintín y Acodado en Campo de Hielo Norte y Bernardo, Occidental y Pío XI en Campo de Hielo Sur, solo por dar algunos ejemplos, hasta una altitud que va por sobre los 6.000 m.s.n.m. en las regiones de Arica y Parinacota, Antofagasta y Atacama, como los glaciares sobre los volcanes Pomerape y Parinacota (ambos ubicados por sobre los 6.000 m.s.n.m. en la Región de Arica y Parinacota).

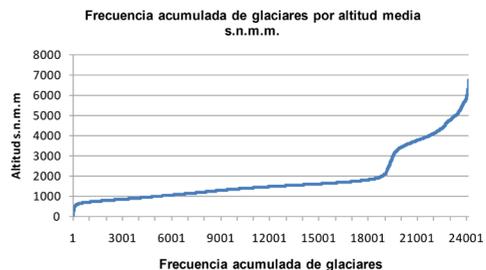


Figura 5. Frecuencia acumulada y superficie acumulada de glaciares bajo la curva hipsométrica. Fuente: Elaboración propia (2016)

Figure 5. Cumulative frequency and cumulative area of glaciers under the hypsometric curve. Source: Own elaboration (2016)

Zonas glaciológicas de Chile

Debido a la variabilidad y diversidad geográfica, climática, geomorfológica, altitudinal y latitudinal del territorio chileno, la distribución del número de glaciares presenta grandes desigualdades regionales y de magnitud de las mismas masas de hielo presentes en cada zona. En este contexto, la Estrategia Nacional de Glaciares de la DGA realizada el año 2009 dividió al país en cuatro grandes zonas glaciológicas (Norte, Centro, Sur y Austral) de la siguiente manera (figura 6):

Zona Norte: Desde el límite con Perú hasta la cuenca del río Choapa.

Zona Central: Desde la cuenca del río Aconcagua hasta la cuenca del río Maule.

Zona Sur: Desde la cuenca del río Itata hasta la cuenca del río Aysén.

Zona Austral: Desde la cuenca del río Baker al extremo austral del país.

En el análisis por zonas glaciológicas, las disparidades son evidentes, dado que la zona norte solo posee un 1% del total de superficie englaciada del país, la zona centro un 4%, la zona sur un 7% y la zona austral concentra el 88% de la superficie de hielo (tabla 5 y figura 7).

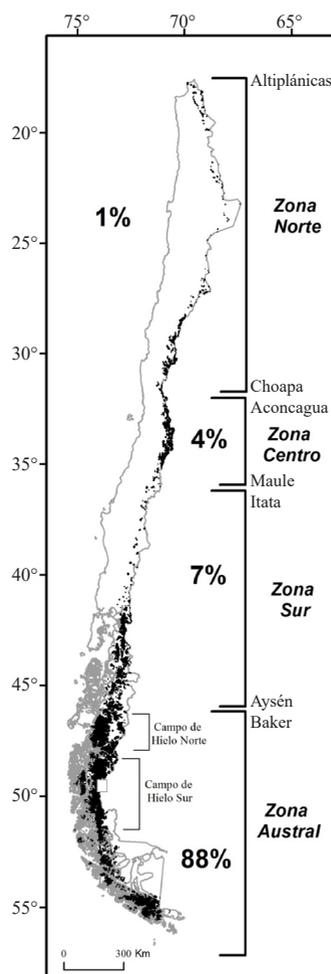


Figura 6. Distribución de glaciares en Chile. Fuente: Elaboración propia (2016)

Figure 6. Glacier distribution in Chile. Source: Own elaboration (2016)

Tabla 5

Número y superficie total de glaciares por zona glaciológica. Fuente: Elaboración propia (2016)

Table 5

Total number and surface of glaciers by glaciological area. Source: Own elaboration (2016)

Zona Glaciológica	Número de glaciares	Superficie glaciares (km ²)
Zona Norte	2.142	180,2
Zona Centro	2.615	854,7
Zona Sur	5.660	1.700,8
Zona Austral	13.697	20.905,8
Total	24.114	23.641,4*

*Aproximado.

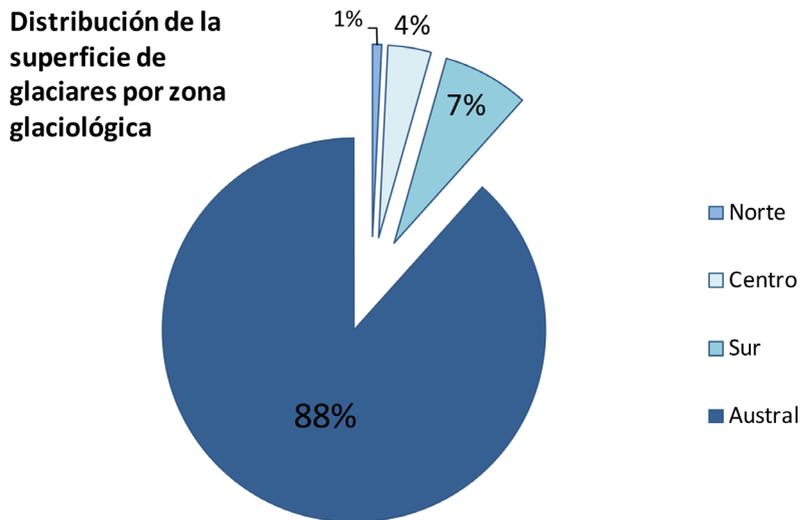


Figura 7. Porcentaje de la superficie total de glaciares por zona glaciológica. Fuente: Elaboración propia (2016)

Figure 7. Percentage of the total surface glaciers by glaciological area. Source: Own elaboration (2016)

Comparación de las zonas glaciológicas

Dentro de las diferencias entre las distintas zonas glaciológicas se puede mencionar que en la zona norte se aprecia un fuerte predominio de los glaciares rocosos los cuales representan el 64% del número de glaciares y el 51% de la superficie

total de hielo de la zona glaciológica. En importancia de superficie los siguen los glaciares de montaña y luego los glaciares de valle. Cabe señalar que no hay presencia de glaciares de valle en la zona norte. Asimismo, en la zona centro la distribución de glaciares según la clasificación morfológica también muestra

una preponderancia en el número de glaciares rocosos representando el 55%, siendo la zona glaciológica que contiene más glaciares de este tipo (1.456). No obstante lo anterior, el mayor aporte en superficie lo entregan los glaciares de montaña con el 33%. En esta zona ya se nota presencia de glaciares de Valle (79 glaciares) aportando el 30% de la superficie total englaciada de la Zona Centro. Por el contrario, en la Zona Sur ya no se detecta la presencia de glaciares rocosos, en esta zona la mayor cantidad de

glaciares corresponde a glaciaretos (3.467) con el 61%, no obstante lo anterior, el mayor tamaño de los glaciares de montaña hacen que este tipo de cuerpos de hielo aporten el 81% de la superficie de la Zona Sur. Por último en la Zona Austral están los dos grandes campos de hielo (Campo de Hielo Norte y Sur), los cuales representan el 66% de la superficie de la zona glaciológica y el 58% del total del hielo nacional, convirtiéndolos por ende, en los mayores cuerpos de hielo del país con 13.851 km² de superficie (tabla 6).

Tabla 6

Número y superficie de glaciares por zona glaciológica según clasificación morfológica. Fuente: Elaboración propia (2016)

Table 6

Number and surface of glaciers by glaciological area according to morphological classification. Source: Own elaboration (2016)

Clasificación Morfológica	N° y Superficie	Zona Norte	Zona Centro	Zona Sur	Zona Austral
Glaciarete	N° de Glaciares	579	639	3.467	7.912
	Superficie (km ²)	19,7	25,7	124,3	276,1
Glaciar Rocoso	N° de Glaciares	1.375	1.456	s/r	s/r
	Superficie (km ²)	93,7	276,2	s/r	s/r
Glaciar de Montaña	N° de Glaciares	188	441	2.161	5.229
	Superficie (km ²)	66,8	288,9	1.391,5	4.870,7
Glaciar de Valle	N° de Glaciares	s/r	79	32	190
	Superficie (km ²)	s/r	263,8	185	1.907,9
Glaciar Efuate de Campo Hielo	N° de Glaciares	s/r	s/r	s/r	366
	Superficie (km ²)	s/r	s/r	s/r	13.851,1
Total por Zona Glaciológica	N° de Glaciares	2.142	2.615	5.660	13.697
	Superficie (km ²)	180,2	854,7	1.700,8	20.905,8

s/r: Sin registro según Inventario Nacional de Glaciares DGA (2014).

En cuanto a la exposición de los glaciares, se aprecia que todas las zonas glaciológicas presentan orientaciones mayoritariamente hacia el S-E y el S, manteniendo en todas las zonas una tendencia similar al nivel nacional concatenado. Por el contrario, en cuanto a la orientación de la superficie expuesta, tanto la zona norte, centro y sur se comportan de manera congruente y similar a la exposición de total de glaciares

por cada una de las zonas. No obstante lo anterior, la zona austral presenta una marcada orientación al oeste (W), producto de la magnitud de los glaciares efluentes de la fachada occidental de los campos de Hielo Norte y Sur. Cabe señalar que su importancia en cuanto a aporte de superficie es tal, que es capaz de influenciar todo el esquema nacional con la misma tendencia que la zona austral (figura 8).

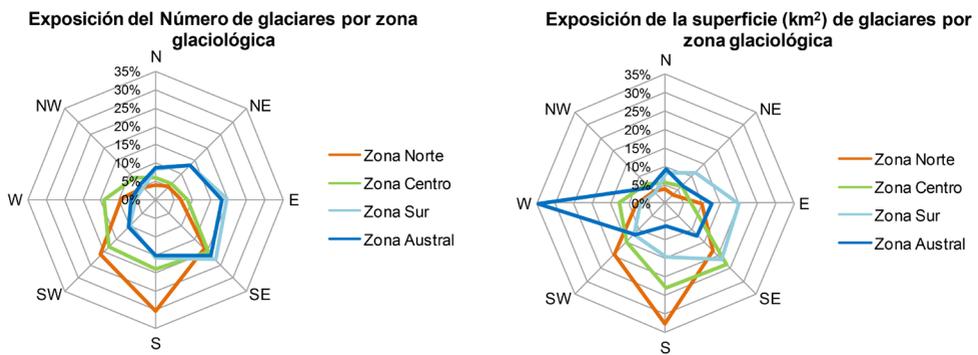


Figura 8. Exposición del número y superficie de glaciares por zona glaciológica. Fuente: Elaboración propia (2016)

Figure 8. Exposure of the number and surface of glaciers by glaciological area. Source: Own elaboration (2016)

Para la altitud de los glaciares por zona glaciológica, se puede apreciar claramente una gradiente decreciente de altitud desde el norte hacia el sur, ya que los glaciares de la Zona Norte comienzan a aparecer desde los 3.400 m.s.n.m. y hasta por sobre los 6.000 m.s.n.m. Por su parte en la Zona Centro el desarrollo de glaciares comienza desde los 2.100 m.s.n.m y hasta alrededor de los 6.000 m.s.n.m. En la Zona Sur se pueden encontrar glaciares desde los 450

m.s.n.m y los más altos se encuentran a una altitud de 3.000 m.s.n.m. Por último, en la Zona Austral varios son los glaciares que tienen su frente desembocando en fiordos a nivel del mar como el caso del glaciar Bernardo y el Amalia (ambos en la fachada occidental de Campo de Hielo Sur), y las altitudes máximas se encuentran hasta cerca de los 2.700 m.s.n.m. Por lo tanto se puede decir que el efecto de latitud se hace patente en la distribución altitudinal

de los glaciares, ya que a altas latitudes serán zonas más frías debido al menor ángulo de incidencia de los rayos solares, mermando la disponibilidad de radiación (Espinoza, Gutiérrez, & Hayek, 1979), por lo que se podrán encontrar glaciares a más baja altura. Por el contrario, a latitudes bajas representan zonas más cálidas, entonces los glaciares tienen un desarrollo a mayores alturas donde las condiciones son más frías por gradiente térmico altitudinal, el cual estipula que la temperatura desciende alrededor de 6°C por cada 1.000 m de altura (figura 9).

Equivalente en agua de los glaciares a nivel nacional

Para el cálculo del equivalente en agua de todos los glaciares, se utilizó la fórmula para estimar el espesor medio de Chen & Ohmura (1990). Para los glaciares rocosos se estimó en un 50% el volumen total de hielo contenido (Barsch, 1996)

El equivalente en agua de todos los cuerpos de hielo catastrados en el inventario nacional de glaciares corresponde a un total de 3.175,6 km³. Por zona glaciológica, la Zona Norte posee solo el 0,1% del agua, la Zona Centro el 0,8%, la Zona Sur 1,7% y la Zona Austral el 97,3% (tabla 7 y figura 10).

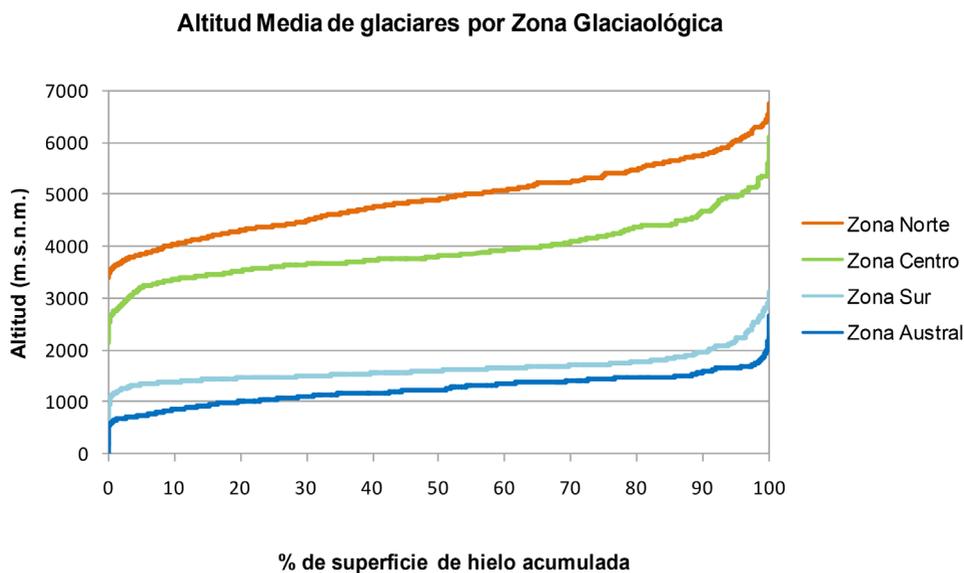


Figura 9. Porcentaje de superficie de glaciares bajo la curva hipsométrica según zonas glaciológicas.

Fuente: Elaboración propia (2016)

Figure 9. Percentage of surface of glaciers under the hypsometric curve according to glaciological area. Source: Own elaboration (2016)

Tabla 7

Equivalente en agua (km³) de los glaciares por zona glaciológica. Fuente: Elaboración propia (2016)

Table 7

Water equivalent (km³) of glaciers by glaciological area. Source: Own elaboration (2016)

Zona Glaciológica	Número de glaciares	Superficie glaciares (km ²)	Equivalente en agua (km ³)	% de equivalente en agua
Zona Norte	2.142	180,2	2,3	0,1%
Zona Centro	2.615	854,7	26,6	0,8%
Zona Sur	5.660	1.700,8	55,3	1,7%
Zona Austral	13.697	20.905,8	3.091,4	97,3%
Total	24.114	23.641,4	3.175,7	100%*

*Porcentaje aproximado.

Porcentaje de equivalente en agua por Zona Glaciológica

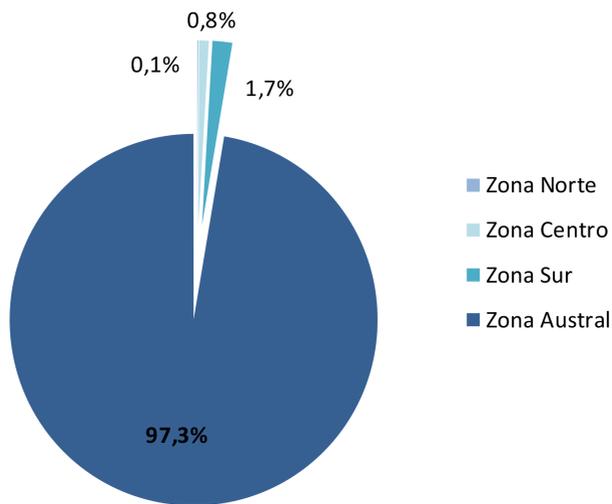


Figura 10. Porcentaje del equivalente en agua de los glaciares por zona glaciológica. Fuente: Elaboración propia (2016)

Figure 10. Water equivalent percentage of glaciers by glaciological area. Source: Own elaboration (2016)

A nivel regional, entre las regiones de Aysén y Magallanes concentran el 98% del equivalente en agua a nivel nacional, por ende, todas las demás regiones suman

solo el 2%. Para la Región Metropolitana, su equivalente en agua es de 11,4 km³, correspondiente a un 0,4% a nivel nacional (tabla 8).

Tabla 8

Equivalente en agua (km³) de los glaciares por regiones. Fuente: Elaboración propia (2016)

Table 8

Water equivalent (km³) of glaciers by region. Source: Own elaboration (2016)

Región	Nº de glaciares por Región	Superficie glaciar por Región (km ²)	Equivalente en agua (km ³)	% de equivalente en agua
Arica y Parinacota	327	30,4	0,3	0,01%
Tarapacá	91	6,4	0,04	0,001%
Antofagasta	139	7,2	0,05	0,002%
Atacama	749	87,9	1,5	0,05%
Coquimbo	836	48,3	0,4	0,01%
Valparaíso	715	135,8	2,9	0,09%
Metropolitana	999	388,3	11,4	0,4%
O'Higgins	683	292,3	11,5	0,4%
Maule	218	38,2	0,8	0,02%
Biobío	194	39,8	1,3	0,04%
Araucanía	140	64,5	2,6	0,08%
Los Ríos	50	36,8	1,8	0,06%
Los Lagos	3.225	928,9	28,6	0,9%
Aysén	8.943	10.214,7	1.564,8	49,3%
Magallanes	6.805	11.321,9	1.547,7	48,7%
Total	24.114	23.641,4	3.175,7	100%

Conclusión

Chile posee un total de aproximado de 24.114 glaciares con una superficie estimada de 23.641,4 km², lo que lo convierte en el país con la mayor cobertura de hielo de Sudamérica, con cerca del 80,5%.

Los glaciares presentes en el territorio nacional se manifiestan con una amplia distribución a lo largo de todo el país, y se pueden percibir grandes diferencias zonales en cuanto al número de glaciares y a la superficie englacada,

notándose una tendencia notoria hacia el incremento en cantidad de glaciares y superficie en las regiones de Chile central (Valparaíso y Metropolitana) y austral (Aysén y Magallanes). Debido a la variabilidad y diversidad geográfica, climática, geomorfológica, altitudinal y latitudinal del territorio chileno, existe una distribución del número de glaciares con grandes desigualdades regionales y de magnitud de las mismas masas de hielo en cada zona.

La Zona Norte solo posee un 1% del total de superficie englacada del país, la Zona

Centro un 4%, Zona Sur un 7% y la Zona Austral concentra el 88% de la superficie de hielo.

En la zona norte se aprecia un fuerte predominio de los glaciares rocosos, los cuales van perdiendo representatividad más al sur, dando paso a la mayor importancia en términos de superficie a los glaciares de montaña en la zona centro y sur, en esta última ya no se detecta presencia de glaciares rocosos. Por último en la zona austral, la presencia de los dos grandes campos de hielo (Campo de Hielo Norte y Sur), representan el 58% del total del hielo nacional, convirtiéndolos por ende, en los mayores cuerpos de hielo del país con 13.851,1 km² de superficie.

El equivalente en agua de todos los cuerpos de hielo catastrados en el inventario nacional de glaciares corresponde a un total de 3.175,7 km³. La Zona Norte posee solo el 0,1% del agua, la Zona Centro el 0,8%, la Zona Sur 1,7 y la Zona Austral el 97,3%.

Agradecimientos

Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT)

Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.

Referencias

Azócar, G. & Brenning, A. (2008). *Intervenciones de glaciares rocosos en minera Los Pelambres, Región de Coquimbo, Chile*. (Informe técnico). Department of Geography and Environmental Management of Waterloo, Ontario, Canada. Recuperado de <http://center-hre.org/wp-content/uploads/2012/10/Azocar-Brenning-2008-Pelambres.pdf>

Bahr, D. B., Meier, M. F., & Peckham, S. D. (1997). The physical basis of glacier volume-area scaling. *Journal of Geophysical*

Research: Solid Earth, 102(B9), 20.355-20.362. <https://doi.org/10.1029/97jb01696>

Barry, R. & Gan, T.Y. (2011). *The global cryosphere: past, present and future*. Cambridge University Press.

Barsch, D. (1996). *Rockglaciers. Indicators for the Present and Former Geoecology in High Mountain Environments*. Heidelberg: Springer Verlag.

Bauder, A., Funk, M., & Huss, M. (2007). Ice-volume changes of selected glaciers in the Swiss Alps since the end of the 19th century. *Annals of Glaciology*, 46(1), 145-149. <https://doi.org/10.3189/172756407782871701>

Benn, D. & Evans, D. (1998). *Glaciers and Glaciation*. London: Arnold.

Bishop, M. P., Olsenholler, J. A., Shroder, J. F., Barry, R. G., Raup, B. H., Bush, A. B., Copland L., Dwyer J. L., Fountain A., Haeberli, W., Käab, A., Paul F., Hall, D., Kargel, J., Molnia, B.F., Trabant D.C. & Wessels A. (2004). Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS): remote sensing and GIS investigations of the Earth's cryosphere. *Geocarto Internacional*, 19(2), 57-84. <https://doi.org/10.1080/10106040408542307>

Bogorodsky, V., Bentley, C., & Gudmandsen, P. (1985). *Radioglaciology*. Netherlands: D. Reidel, Dordrecht.

Bolch, T., Menounos, B., & Wheate, R. (2010). Landsat-based inventory of glaciers in western Canada, 1985-2005. *Remote sensing of Environment*, 114(1), 127-137. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.015>

Bown, F., Rivera, A., & Acuña, C. (2008). Recent glaciers variations at the Aconcagua basin, central Chilean Andes. *Annals*

- of *Glaciology*, 48, 43-48. <https://doi.org/10.3189/172756408784700572>
- Chen, J. & Ohmura, A. (august, 1990). Estimation of Alpine glacier water resources and their change since the 1870s. *Hydrology in Mountainous Regions, I – Hydrological Measurements; the Water Cycle*. Two Lausana Symposia.
- Cortés, G., Giroto, M., & Margulis, S. (2013). Analysis of sub-pixel snow and ice extent over the extratropical Andes using spectral unmixing of historical Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 141, 64-78. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.10.023>
- Dirección General de Aguas & Centro de Estudios Científicos, DGA-CECs. (2011). *Variaciones Recientes de Glaciares en Chile, según principales zonas glaciológicas*. (Informe Final S.I.T. N°261) Ministerio de Obras Públicas. República de Chile. Recuperado de <http://documentos.dga.cl/GLA5360.pdf>
- Dirección General de Aguas & Centro de Estudios Científicos, DGA-CECs. (2009). *Estrategia Nacional de Glaciares, Fundamentos*. (Informe S.I.T. N°205). Ministerio de Obras Públicas. República de Chile. Recuperado de <http://documentos.dga.cl/GLA5194v1.pdf>
- Dirección General de Aguas & Departamento de Ingeniería Civil, División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente, Universidad de Chile, DGA-UCHILE. (2012). *Modelación del balance de masa y descarga de agua en glaciares de Chile central*. (Informe Final S.I.T. N°307) Ministerio de Obras Públicas. República de Chile. Recuperado de <http://documentos.dga.cl/GLA5565.pdf>
- Espinoza, G., Gutierrez, J., & Hayek, E. (1979). Gradiente latitudinal de las temperaturas máximas, mínimas y medias en Chile. *Anales del Museo de Historia Natural Valparaíso*, 12, 77-82.
- FAO. (2012). *Diagnóstico Nacional de Montaña. Fortalecimiento de la gestión participativa para el desarrollo sostenible de los Andes*. (Informe Chile). Recuperado de http://www.fao.org/fileadmin/templates/mountain_partnership/doc/TCP_Andes/Diagnostico_Nacional_de_Montana_Version_editadapdf.pdf
- Flowers, G.E. & Clarke, G.K.C. (1999). Surface and bed topography of Trapridge Glacier, Yukon Territory, Canada: Digital elevation models and derived hydraulic geometry. *Journal of Glaciology*, 45(149), 165-174. <https://doi.org/10.1017/s0022143000003142>
- Hambrey, M. & Alean, J. (2004). *Glaciers*. Cambridge, New York, Melbourne: Cambridge University Press.
- Hock, R. (2005). Glacier melt: a review of processes and their modelling. *Progress in Physical Geography*, 29(3), 362-391. <https://doi.org/10.1191/0309133305pp453ra>
- Huss, M. & Bauder, A. (2009). 20th-century climate change inferred from four long-term point observations of seasonal mass balance. *Annals of Glaciology*, 50(50), 207-214. <https://doi.org/10.3189/172756409787769645>
- Huss, M., Farinotti, D., Bauder, A., & Funk, M. (2008). Modelling runoff from highly glacierized alpine drainage basins in a changing climate. *Hydrological processes*, 22(19), 3.888-3.902. <https://doi.org/10.1002/hyp.7055>
- Immerzeel, W.W., Pellicciotti, F., & Bierkens, M.F.P. (2013). Rising river flows throughout the twenty-first century in two Himalayan glacierized watersheds.

- Nature geoscience*, 6(9), 742-745. <https://doi.org/10.1038/ngeo1896>
- Immerzeel, W., Van Beek, L., & Bierkens, M. (2010). Climate change will affect the Asian water towers. *Science*, 328, 1.382-1.385. <https://doi.org/10.1126/science.1183188>
- Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC. (2013). *Climate Change 2013, The Physical Science Basis*. (Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Chapter four: Observations Cryosphere). Recuperado de http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_Chapter04_FINAL.pdf
- Jansson, P., Hock, R., & Schneider, T. (2003). The concept of glacier storage: a review. *Journal of Hydrology*, 282(1-4), 116-129. [https://doi.org/10.1016/s0022-1694\(03\)00258-0](https://doi.org/10.1016/s0022-1694(03)00258-0)
- Kääb, A. (2008). Glacier volume changes using ASTER satellite stereo and ICESat GLAS laser altimetry. A test study on EdgeØya, eastern Svalbard. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46 (10), 2.823-2.830. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2008.2000627>
- Kaser, G., Großhauser, M., & Marzeion, B. (2010). Contribution potential of glaciers to water availability in different climate regimes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(47), 20.223-20.227. <https://doi.org/10.1073/pnas.1008162107>
- Müller, F., Cafilisch, T., & Müller, G. (1977). *Instructions for compilation and assemblage of data for a World Glacier Inventory*. Zurich: Department of Geography, Swiss Federal Institute of Technology (ETH).
- National Snow and Ice Data Center (NSIDC). (1999). *World glacier inventory*. Boulder, Colorado. (Updated 2007). http://nsidc.org/data/glacier_inventory/index.html
- Nicholson, L., Marin, J., López, D., Rabatel, A., Bown, F., & Rivera, A. (2009). Glacier inventory of the upper Huasco valley, Norte Chico, Chile: glacier characteristics, glacier change and comparison with central Chile. *Annals of Glaciology*, 50, 111-118. <https://doi.org/10.3189/172756410790595787>
- Ohlanders, N., Rodriguez, M., & McPhee, J. (2013). Stable water isotope variation in a Central Andean watershed dominated by glacier and snowmelt. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(3), 1.035-1.050. <https://doi.org/10.5194/hessd-9-12227-2012>
- Ohmura, A. (2009). Completing the World Glacier Inventory. *Annals of Glaciology*, 50:144-148. <https://doi.org/10.3189/172756410790595840>
- Paterson, W.S.B. (1994). *The Physics of Glaciers*. Oxford, New York and Tokyo: Elsevier.
- Paul, F., Huggel, C., & Kääb, A. (2004). Combining satellite multispectral image data and a digital elevation model for mapping debris-covered glaciers. *Remote Sensing of Environment*, 89, 510-518. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.007>
- Pellicciotti, F., Helbing, J., Rivera, A., Favier, V., Corripio, J., Araos, J., Sicart, J., & Carenzo, M. (2008). A study of the energy balance and melt regime on Juncal Norte Glacier, semi-arid Andes of central Chile, using melt models of different complexity. *Hydrological Processes*, 22, 3.980-3.997. <https://doi.org/10.1002/hyp.7085>
- Pellicciotti, F., Ragetti, S., Carenzo, M., & McPhee, J. (2013). Changes of glaciers in the Andes of Chile and priorities for

- future work. *The Science of the Total Environment*, 493, 1.197-1.210. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.055>
- Peña, H. & Nazarala, B. (august 1987). Snowmelt-runoff simulation model of a central Chile Andean basin with relevant orographic effects. Simposio realizado en la Conferencia Large Scale effects of Seasonal Snow cover. IAHS. Vancouver.
- Radić, V. & Hock, R. (2010). Regional and global volumes of glaciers derived from statistical upscaling of glacier inventory data. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 15(F1). <https://doi.org/10.1029/2009jf001373>
- Radić, V. & Hock, R. (2006). Modelling mass balance and future evolution of glaciers using ERA-40 and climate models-A sensitivity study at Storglaciären, Sweden. *J. Geophys. Res.*, 111, F03003. <https://doi.org/10.1029/2005jf000440>
- Ragetti, S., Cortés, G., McPhee, J., & Pellicciotti, F. (2013). An evaluation of approaches for modelling hydrological processes in high-elevation, glacierized Andean watersheds. *Hydrological Processes*, 28(23), 5.674-5.695. <https://doi.org/10.1002/hyp.10055>
- Ragetti, S. & Pellicciotti, F. (2012). Calibration of a physically based, spatially distributed hydrological model in a glacierized basin: On the use of knowledge from glaciometeorological processes to constrain model parameters. *Water Resources Research*, 48(3). <https://doi.org/10.1029/2011wr010559>
- Rivera, A., Acuna, C., Casassa, G., & Bown, F. (2002). Use of remotely sensed and field data to estimate the contribution of Chilean glaciers to eustatic sea-level rise, *Ann. Glaciol.*, 34(1), 367-372. <https://doi.org/10.3189/172756402781817734>
- Rivera, A., Casassa, G., Acuña, C., & Lange, H. (2000). Variaciones recientes de glaciares en Chile. *Investigaciones Geográficas*, 34, 25-52. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2000.27709>
- Rivera, A. & Casassa, G. (1999). Volume changes on Pio XI glacier, Patagonia: 1975-1995. *Global and Planetary Change*, 22 (1-4), 233-244. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(99\)00040-5](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(99)00040-5)
- Rivera, A., Aravena, J., & Casassa, G. (1997). Recent fluctuations of glacier Pio XI, Patagonia: Discussion of a glacial surge hypothesis. *Mountain Research and Development*, 17, 4, 309-322. <https://doi.org/10.2307/3674021>
- Rivera, A. (1992). El glaciar Pio XI: Avances y retrocesos, el impacto sobre su entorno durante el presente siglo. *Rev. Geográfica de Chile Terra Australis*, 36, 33-62.
- Röthlisberger, H. & Lang, H. (1987). Glacial hydrology. In: Gurnell A and Clark MJ (eds) *Glacio-Fluvial Sediment Transfer: An Alpine Perspective* (pp. 207-274). New York: Wiley.
- Segovia, A. (2015). Glaciares en el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas por el Estado (SNASPE). *Investigaciones Geográficas*, 49, 51-68.
- Segovia, A. (2014). *Caracterización Glaciológica de Chile y Valoración de Servicios Ecosistémicos de Glaciares en base a Mercados Reales. Estudio de caso del Monumento Natural el Morado* (Tesis de Magister inédita) Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Videla, Y. & McPhee, J. (2015). *Combining point and distributed snowpack data with landscape-based discretization for hydrologic modeling of the snow-*

- dominated Maipo River Basin, in the semi-arid Andes central Chile.* Trabajo presentado en American Geophysical Union, Fall Meeting, San Francisco.
- Walder, J. & Driedger, C. (1995). Frequent outburst floods from South Tahoma Glacier, Mount Rainier, U.S.A.: Relation to debris flows, meteorological origin and implications for subglacial hydrology, *Journal of Glaciology*, 41(137), 1-10. <https://doi.org/10.1017/s0022143000017718>
- Warren, C., Rivera, A., & Post, A. (1997). Greatest Holocene advance of Glaciar Pio XI, Chilean Patagonia: possible causes. *Annals of Glaciology*, 24, 11-15. <https://doi.org/10.1017/S026030550001185X>
- Wilson, R., Carrión, D., & Rivera, A. (2016). Detailed dynamic, geometric and supraglacial moraine data for Glaciar Pio XI, the only surge-type glacier of the Southern Patagonia Icefield. *Annals of Glaciology*, 32, 1-12. <https://doi.org/10.1017/aog.2016.32>
- World Glacier Monitoring Service (WGMS). (1989). *World glacier inventory. Status 1988*. Zürich: W. Haeberli et. al. (Ed.). IAHS (ICSU)/UNEP/UNESCO.
- Zemp, M., Hoelzle, M., & Haeberli, W. (2009). Six decades of glacier mass-balance observations: a review of the worldwide monitoring network. *Annals of Glaciology*, 50(50):101-111. <https://doi.org/10.3189/172756409787769591>