

# Glaciares en Chile semiárido: cambio climático, minería y seguridad hídrica

*Una base científica para el debate político*

Informe preparado por Dr. Alexander Berland (University of Nottingham, Reino Unido)  
para Chile Sustentable, Mayo de 2016

# **Glaciares en Chile semiárido: cambio climático, minería y seguridad hídrica**

## *Una base científica para el debate político*

Informe preparado por Dr. Alexander Berland (University of Nottingham, Reino Unido)  
para Chile Sustentable, Mayo de 2016

---

### **Introducción**

La importancia de los glaciares en términos medioambientales y socioeconómicos ha estado ampliamente establecida por la comunidad científica. Representan las mayores reservas de agua dulce en el mundo y su aporte hídrico es esencial para los ecosistemas y medios de subsistencia humana en muchas zonas montañosas. En el norte y centro de Chile, son especialmente importantes puesto que estas zonas áridas y semiáridas actualmente enfrentan el estrés hídrico, y este estrés será agravado a lo largo del presente siglo debido al cambio climático (IPCC, 2015a: pp.79, 119). Además, la geografía particular del país, con su estrechez y espalda de cordillera de sur a norte, significa que virtualmente todos los regímenes hidrológicos incorporan directa o indirectamente las aguas de deshielo de los Andes.

A pesar de su evidente importancia, la legislación chilena vigente protege de una forma muy limitada a los glaciares. Actualmente, no hay ninguna ley que proteja los glaciares específicamente, y en la tramitación de la inédita Ley de la Protección y Preservación de los Glaciares se contempla garantizar la protección total solo de los que se ubican en Parques Nacionales y Reservas de Regiones Vírgenes. Esto es significativo porque, además de estar amenazados por el cambio climático, los glaciares están siendo destruidos por la industria minera, paulatina pero sistemáticamente. La situación es especialmente crítica en la zona central y el Norte Chico de Chile, donde existen una concentración importante de glaciares y actividad minera, pero una casi total ausencia de áreas protegidas que contienen glaciares.

Y cabe mencionar que en estas regiones también se concentran la población y la actividad económica y política del país. De este modo, está claro que hay una notable desconexión entre, por un lado, la dependencia socioeconómica y medioambiental de los glaciares en la región, la cual es señalada ampliamente por la evidencia científica, y, por otro lado, las políticas públicas y la postura de la minería con respecto a la preservación de estas esenciales reservas de agua.

En vistas a esta desconexión, y con el objetivo de ampliar el debate público en dicha materia, el presente informe presenta una síntesis de los resultados de recientes investigaciones académicas sobre los glaciares en Chile Central y Norte-Central. Tras brevemente describir los fundamentos de la glaciología y el contexto de Chile, se abordan tres temas centrales: (1) la importancia hídrica y socioeconómica de los glaciares, (2) la relación entre los glaciares, el cambio climático y la seguridad hídrica, y (3) los impactos de la minera sobre los glaciares. Para concluir, el informe reflexiona sobre las implicaciones políticas de la evidencia presentada.

### **Fundamentos y estatus de conservación de los glaciares chilenos**

Un glaciar es una masa de hielo existente en la superficie terrestre, formada por la acumulación, compactación y recrystalización de la nieve en montañas o en regiones frías. Crecen cuando la precipitación anual de nieve supera la evaporada y derretida en verano, por lo cual la mayoría se encuentra en zonas cercanas a los polos y en regiones montañosas. Los glaciares cubren un 10% de la Tierra y contienen alrededor del 75% del agua dulce en el mundo (Bridge and Demicco, 2008: p.292). Por esta razón, han sido calificados de ‘importantes embalses hídricos estacionales y de larga duración’ por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés; IPCC, 2013: p.335), y de ‘reservas estratégicas de agua’ en el contexto de política medioambiental (Borquez et al., 2006; Chile Sustentable, 2013; Berland y Larraín, 2016). Los glaciares son clasificados según su forma (p. ej. de valle, de nicho, campo de hielo), régimen climático (tropical, temperado o polar); condiciones térmicas (base fría, base caliente o politermal), y según la visibilidad superficial de su hielo (cubiertos o blancos). Se denominan glaciares rocosos los que están compuestos principalmente por fragmentos de roca o sedimentos unidos por hielo (DGA, 2014: diapositiva 6).

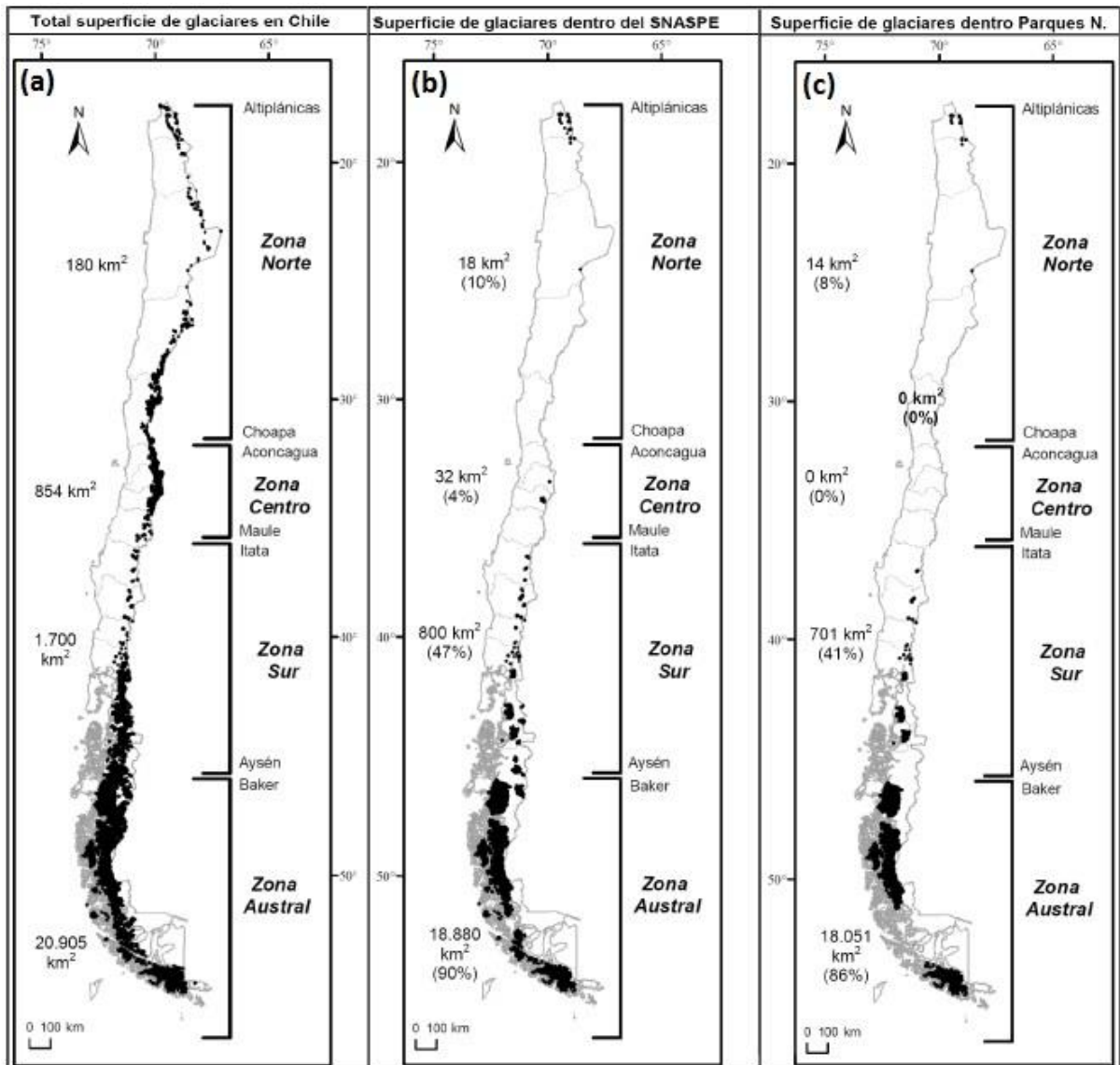
En Chile, existen unos 24.130 glaciares con una superficie total de más de 23.680 km<sup>2</sup>, lo que equivale a un 86% de toda el área englaciada en Sudamérica. Un 88% de la superficie total de los glaciares chilenos, se ubica en la zona austral del país, donde un clima boreal permite la permanencia de los extensos Campos de Hielo Norte y Sur (DGA, 2014: diap. 5). Sin embargo, como demuestra la Figura 1a, fuera de esta zona, se encuentra una notable concentración de glaciares en la cordillera del centro y el Norte Chico de Chile. Aunque en términos absolutos solo existe un 4-5% de la superficie glaciar nacional en esta región, sus

glaciares son cruciales en términos hidrológicos, como se discutirá en la próxima sección del informe.

En el contexto de la tramitación de la Ley de la Protección y Preservación de los Glaciares por el Congreso Chileno, el estatus de los glaciares relativo a las áreas protegidas del país ha generado considerable atención política y académica. La ley contempla brindar una protección garantizada a todos los glaciares dentro de Parques Nacionales y, posiblemente, a una fracción inconcreta de los que quedan fuera. Otro marco legal para su posible protección es el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE) que, si bien no ha entrado en vigencia oficialmente, corresponde a dos adicionales categorías de ambientes que el Estado maneja para su conservación: las Reservas y Monumentos Naturales.

Segovia (2015) ha realizado un detallado catastro de los glaciares presentes en dichas áreas protegidas, el cual revela que el SNASPE tiene bajo su jurisdicción el 43% de los glaciares del país. No obstante, existen grandes discrepancias geográficas, con algunas regiones del norte y centro sin glaciares dentro del SNASPE, como las de Atacama, Coquimbo y el Maule (Figura 1b). El escenario es peor si se considera solo los glaciares situados en un Parque Nacional, de los cuales no hay ninguno dentro de una franja que se extiende desde la región de Atacama hasta la del Maule (Figura 1c). Segovia afirma que estas discrepancias en la conservación glaciológica son de gran relevancia, puesto que las mencionadas regiones ya enfrentan conflictos de escasez de agua relacionados con la competencia entre actividades industriales y agrícolas, además del consumo del 65% de la población nacional que habita la zona. Por esto, el investigador destaca la importancia del debate legislativo sobre el estatus de los glaciares de la siguiente forma:

solo poner en categoría de preservación los glaciares que se encuentren dentro de Parques Nacionales, priva de los servicios ecosistémicos de los glaciares a seis regiones que actualmente presentan complicaciones de escasez hídrica, ... [las cuales] quedaría[n] en una incertidumbre acerca la conservación y/o preservación de los glaciares, con los consiguientes problemas de mantención de los servicios ecosistémicos tanto de provisión, regulación y culturales que estos proveen (Segovia, 2015: p.66).



**Figura 1.** Distribución de la superficie de glaciares en (a) todo Chile, (b) bajo la protección de SNASPE, y (c) dentro de Parques Nacionales, por zona glaciológica. Fuente: Segovia (2015: pp. 58, 63).

### Aportes hídricos y socioeconómicos de los glaciares

En Chile Central y el Norte Chico prevalece un clima semiárido, caracterizado por una estación de lluvias entre Mayo y Agosto, y muy baja precipitación entre Octubre y Marzo. De este modo, la estación seca coincide con los meses de temperaturas máximas y, por consiguiente, de mayor necesidad de agua para el riego, consumo humano y la mantención de ecosistemas. Sin embargo, cuando las lluvias se reducen y las temperaturas suben, el deshielo de la criósfera de la cordillera se incrementa, convirtiéndose en una de las principales fuentes de agua en los ríos y arroyos de la región. Mientras que el derretimiento

de nieve suele predominar a finales de primavera y comienzos de verano, el de los glaciares, que son de mayor permanencia, representa un clave contribuyente entre enero y abril. Estos aportes hídricos de verano son esenciales para sostener los ecosistemas y medios de subsistencia humanos a lo largo de la zona semiárida, pero la situación es especialmente crítica en Chile Central, donde se ubican glaciares relativamente grandes, extensas áreas agrícolas y las ciudades principales del país (Ohlander et al., 2013: p.1035; Pellicciotti et al., 2014: p.1198).

En vistas a dicha importancia hidrográfica y socioeconómica, varios investigadores han buscado cuantificar el aporte de los glaciares de Chile semiárido a los recursos hídricos locales. El Cuadro 1 presenta un resumen de cinco estudios (cuatro publicados desde el año 2012) que han calculado la proporción del caudal de ríos en esta zona que se origina de glaciares. Naturalmente, los resultados exhiben notable variabilidad; son producto de distintas metodologías de modelación y cálculo, en base a mediciones tomadas en distintas cuencas hidrográficas y durante distintos periodos de tiempo. No obstante, lo que queda claro es que en varios de estos contextos geográficos y temporales, los glaciares han proporcionado un alto porcentaje—a veces la mayoría—del caudal en las (sub)cuencas estudiadas (quinta columna del cuadro). Peña y Nazarala (1987), cuya investigación de modelación informática ha sido ampliamente citado en el debate sobre la protección de los glaciares, proponen que en veranos de sequía el aporte mensual de los glaciares puede llegar al 67% del caudal del Río Maipo. Aunque los más recientes estudios de modelación no se enfocan en toda esta cuenca hidrográfica, indican que en dos sub-cuencas que drenan al Maipo el caudal derivado de glaciares en ciertos meses del verano llega a 83% y 32% (Castillo et al., 2014). En la sub-cuenca del Río Juncal, que forma parte de la cuenca del Río Aconcagua, los modelos han generado un resultado del 44% durante el periodo de mayor ablación en un año sin sequía (Ragetti y Pellicciotti, 2012), mientras que un análisis de isotopos atribuyó un 50-90% del caudal al deshielo glaciar durante todo un año ‘atípicamente seco’ (Ohlanders et al., 2013).<sup>1</sup>

Gracias a sus aportes hídricos, los glaciares mantienen una amplia gama de servicios ecosistémicos que benefician a la sociedad, como por ejemplo la fecundación de suelos, provisión de madera y regulación de inundaciones y la calidad de aguas. Además, proporcionan servicios culturales de tipo recreacional y estético, así contribuyendo a la industria del turismo (Segovia, 2015: p.53). Calcular el valor monetario total de esta diversidad de servicios implica una tarea inmensa que todavía queda por realizarse. Sin embargo, para dar una idea de los montos involucrados, Segovia (2014) ha realizado una valoración de tres servicios ecosistémicos de los glaciares del Monumento Natural El Morado en la Región Metropolitana: (1) el almacenaje de agua, (2) la provisión de flujo hídrico

---

<sup>1</sup> Se debe reconocer que, como cualquier metodología de inferencia científica, existe un cierto grado de incerteza en los resultados generados por modelos informáticos y otros métodos de cálculo empleados por las investigaciones citadas. No obstante, como parte del proceso científico, sus autores han realizado rigurosos métodos de calibración y verificación que minimicen de una forma significativa tales incertezas.

continuo, y (3) turismo y recreación. Utilizando métodos conservadores, calculó que estos glaciares generan un beneficio económico anual de unos 3.9 mil millones de pesos—lo que supera en aproximadamente 173 veces el presupuesto del mismo Monumento Natural El Morado para el año 2013 (Segovia, 2014: p.5).

Es importante reconocer que los glaciares no son la única fuente de las aguas de deshielo de la cordillera chilena. A escala regional, se cree que el derretimiento de nieve representa un mayor contribuyente a la escorrentía anual en zonas semiáridas de Chile. A pesar de ello, Ohlanders (2013: pp.1035-1036) asevera que los glaciares constituyen un fundamental componente del ciclo hidrológico por dos razones: (1) muchas cuencas montañosas tienen una considerable superficie englaciada, y (2) de acuerdo con la alta variación inter-anual de precipitación en la región, el deshielo de nieve es muy variable, y en años secos puede reducirse hasta un 50% del promedio. Este segundo punto es especialmente relevante porque, como se discutirá en la siguiente sección, el cambio climático implica que los niveles de precipitación se disminuirán y la ocurrencia de sequías aumentará en Chile semiárido. Sobre todo, lo que se desprende claramente de la evidencia arriba presentada es que los glaciares ya brindan un gran aporte hídrico en periodos secos, y que sus aportes regulares tienen un enorme valor económico.

**Cuadro 1.** Resumen de investigaciones que han calculado la proporción del caudal proveniente de glaciares en (sub)cuencas del centro y norte de Chile. Fuente: elaboración propia.

Área estudiada	% cobertura glaciar	Periodo	Características del periodo	% caudal de glaciares	Método de cálculo	Referencia
Sub-cuenca de Glaciar Pirámide, Cordillera del Río Maipo	20	4 Dic. 2013-20 Ene. 2013		83	Modelo informático	Castillo et al. (2014)
Sub-cuenca de Glaciar San Francisco, Cordillera del Río Maipo	7	16 Nov. 2012-17 Feb. 2013		32		
Cuenca del Río Maipo		Feb. 1982	En un año ‘seco’	34	Modelo informático	Peña y Nazarala (1987)
		Un mes no especificado en 1968/69	‘El verano más seco registrado en el río Maipo’	67		
		Oct. 1981-Mar. 1982	En un año ‘seco’	20,5 <sup>a</sup>		
		Oct. 1982-Mar. 1983	En un año ‘excepcionalmente lluvioso’	3,8 <sup>a</sup>		
		Oct. 1984-Mar. 1985		6,8 <sup>a</sup>		

		Oct. 1985- Mar. 1986	En un año ‘seco’	16,8 <sup>a</sup>		
Sub-cuenca de Glaciar Juncal, Cuenca del Río Aconcagua	42	12 Dic. 2005 - 27 Ene. 2006	‘Acumulación de nieve relativamente abundante’	16	Modelo inform- ático	Ragetti y Pellicciotti (2012)
		12 Dic. 2008 - 27 Ene. 2009	‘Una estación más seca’	44		
Sub-cuenca del Río Juncal, Cuenca del Río Aconcagua	14	12 Dic. 2005 - 27 Ene. 2006	‘Acumulación de nieve relativamente abundante’	10		
		12 Dic. 2008 - 27 Ene. 2009	‘Una estación más seca’	31		
		Feb.-Abr. 2006	El periodo de mayor ablación en un año de ‘acumulación de nieve relativamente abundante’	44		
	11.5	14 Abr. 2011- 14 Abr. 2012	Un año ‘atípicamente seco’	50-90	Análisis de isotopos	Ohlanders et al. (2013)
Sub-cuenca de Glaciar Tapado, Cuenca del Río Elqui		2 Feb. 2011	‘Después de un déficit hídrico de tres años’	74 <sup>b</sup>	Monitoreo directo y remoto	Pourrier et al. (2014)
sub-cuenca del Río Colorado, Cuenca del Río Elqui		2 Feb. 2011		10 <sup>b,c</sup>		

<sup>a</sup> Promedios calculados por el autor de los porcentajes mensuales de Peña y Nazarala (1987).

<sup>b</sup> Estas cifras tienen un margen de error de +/-19%.

<sup>c</sup> Esta cifra representa el porcentaje del caudal de la sub-cuenca del Río Colorado que proviene solamente del Glaciar Tapado, no incluye el posible aporte hídrico de otros glaciares.

### Los glaciares y el cambio climático

Como resultado del cambio climático—particularmente, el aumento de las temperaturas promedias globales—se ha observado el deterioro de la mayoría de los glaciares del mundo durante las últimas décadas. Según el más reciente Informe de Evaluación del IPCC, es ‘muy probable’ que las tasas de deterioro hayan llegado a un 226 gigatoneladas anuales entre los años 1971-2009, y hasta un 301 gigatoneladas por año en el periodo 2005-2009 (IPCC, 2013: p.319).<sup>2</sup> Con respecto a las tendencias futuras, se predice una reducción del volumen total de los glaciares dentro de los rangos 15-55% y 35-85% a lo largo del siglo XXI de acuerdo a distintos pronósticos de cambio climático (IPCC, 2013: Secciones 13.4.2, 13.5.1), lo que significa que bajo un escenario de calentamiento global limitado se perdería un mínimo del 15%, y bajo un escenario severo se podrá perder hasta el 85%.<sup>3</sup>

<sup>2</sup> Estas cifras tienen un posible margen de error de +/-135 gigatoneladas debido a la incerteza inherente en datos y procesos glaciológicos.

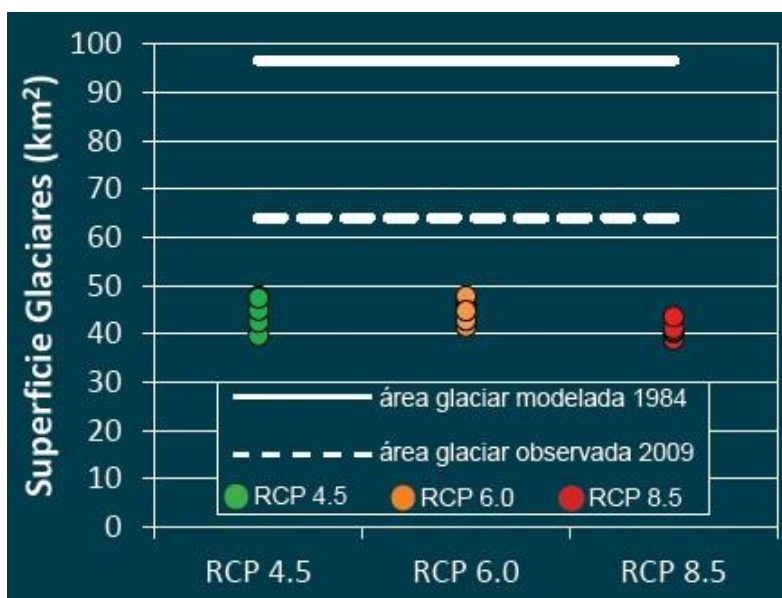
<sup>3</sup> En este cálculo no se incluyen los glaciares en la periferia de las capas de hielo de Groenlandia y Antártica.



El IPCC también señala que la tendencia del retiro de los glaciares asociada con la subida de temperaturas también afecta a Sudamérica y que esta tendencia ha intensificado desde comienzos del presente siglo (IPCC, 2014: pp. 585, 1543). La organización ha compilado un detallado resumen de los cambios físicos documentados recientemente por la literatura científica en las mayores zonas glaciales del continente, del cual la información pertinente a Chile se presenta en el Cuadro 2. Este resumen muestra evidencia de varias significativas reducciones de los glaciares en la zona central, como la pérdida de un 20% de la superficie glacial de la cuenca del Río Aconcagua, que contiene el 14% de todo el hielo entre 32°S y 35°S de latitud (Brown et al., 2008), y un retiro frontal de entre 9 y 50 metros por año de todos los glaciares en los Andes centrales (Le Quesne et al., 2009). Pellicciotti et al. (2014: p.1199), quienes han presentado su propia síntesis de las alteraciones glaciológicas en chilenos, agregan datos adicionales que ilustran la tendencia de deterioro. Algunos estudios también cuantifican la reducción de los glaciares en términos hídricos. Por ejemplo, Bodin et al. (2010: p.461) calculan que el achicamiento del glaciar Punta Negra, ubicado en la cuenca de Laguna Negra en la cordillera santiaguina, desde mediados del siglo XX equivale a la pérdida de 0.95 millones m<sup>3</sup> de agua dulce por década. A diferencia de los glaciares de Chile Central, los de la Zona Norte han sido poco estudiados. Sin embargo, Pellicciotti et al. (2014: p.1198) señalan que la tasa del retiro de los glaciares en el norte supera a la de la zona central, principalmente como resultado de una disminución de precipitaciones, en vez de la subida de temperaturas.

Con respecto a futuras tendencias, el IPCC ha calificado de un ‘riesgo clave’ a mediano y largo plazo (años 2030-40 y 2080-2100) ‘la reducida disponibilidad de agua en zonas semiáridas y dependientes del derretimiento de glaciares’ en toda la región de Sur y Centroamérica (IPCC, 2014: p.79). Además, ha identificado Chile central como una ‘zona crucial’ donde los recursos hídricos ‘se verán reducidos seriamente debido a la reducción de los glaciares’ (IPCC, 2007: p.606). Desafortunadamente, a escala subregional, la modelación informática de futuras dinámicas glaciológicas actualmente permanece en una fase de desarrollo. Pellicciotti et al. (2014) expone una abarcadora discusión de estas simulaciones y las incertezas ligadas a su aplicación. A pesar de la falta de resultados concretos, el Proyecto MAPA (Maipo: Plan de Adaptación), encabezado por el Centro de Cambio Global de la Pontificia Universidad Católica (<http://maipoadaptacion.cl/>), ha generado datos preliminares importantes para la sub-cuenca montañosa de Las Hualtatas del Río Maipo. Sus modelaciones indican que la superficie glacial de la sub-cuenca bajó de casi 100 km<sup>2</sup> en 1984 a un 64 km<sup>2</sup> en 2009, y que (de acuerdo con tres escenarios de cambio climático) disminuirá a entre 38 y 50 km<sup>2</sup> durante los años 2020-2015 (Figura 2). Por su parte, Bodin et al. (2010: p.461) extrapola las tasas históricas de la disminución de glaciares en la cuenca de Laguna Negra (mencionada arriba) equivaldrá a una futura pérdida de más de 3.8 millones m<sup>3</sup> de agua dulce por década.

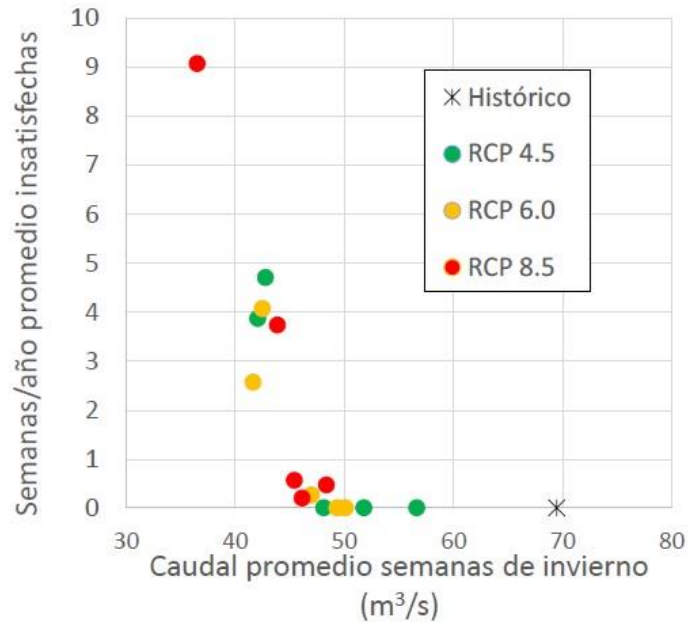
Cabe notar que la disminución de los glaciares es solo una de varios efectos medioambientales asociadas con el cambio climático. Se pronostica que Chile Central también experimentará una reducción de las precipitaciones a lo largo del siglo XXI, mientras que la frecuencia de los extremos de precipitación, como sequías, aumentará en toda Sudamérica (IPCC, 2013: p.1624). Además de examinar la evidencia de estos cambios, el IPCC evalúa en detalle sus consecuencias socio-económicas. La organización afirma que la ya alta vulnerabilidad hídrica de zonas semiáridas en el continente seguirá en aumento, amenazando seriamente el abastecimiento de agua a asentamientos humanos, la producción de alimentos, la generación de energía hidroeléctrica, y hasta provocando inestabilidad económica a causa de grandes migraciones. Se enfatiza en particular el problema de la disponibilidad de agua en ciudades grandes, especialmente Santiago (IPCC, 2014: pp. 79, 119, 1543). A nivel local, el Proyecto MAPA ha simulado las implicaciones de la futura estrechez hídrica para ciertas actividades económicas la cuenca del Maipo. Por ejemplo, como resultado de la reducción del caudal promedio de los ríos durante las próximas tres décadas, se pronostica un incremento en el número de semanas por año cuando la operación del Sistema Maipo de Aguas Andinas falla (Figura 3).



**Figura 2.** Cambio modelado en la superficie glaciar promedio en la sub-cuenca de Maipo en Las Hualtatas para tres simulaciones de cambio climático (una simulación optimista, RCP 4.5; una simulación intermedia, RP 6.0; una simulación pesimista, RP 8.4), años 2020-2050. Fuente: McPhee et al. (2015: p.9).

**Cuadro 2.** Tendencias observadas relacionadas con la criósfera andina. Se utiliza la abreviación LIA para denotar la Pequeña Edad de Hielo y w.e. para ‘equivalente en agua’. En la columna de *Variable code number*, se emplean los números 1-8 para indicar las siguientes variables: (1) aumento en la altitud de la línea de equilibrio de glaciares; (2) calentamiento atmosférica indicado por la temperatura de glaciares medida a alta elevación; (3) el área de reducción; (4) el retiro frontal de glaciares; (5) reducción de volumen; (6) cobertura de nieve; (7) estado de glaciares rocosos; (8) cambios de escorrentía. Fuente: IPCC (2014: pp. 1517-1518).

Region	Documented massifs/sites	Latitude	Significant changes recorded		References	
			Variable code number <sup>a</sup>	Value of trend [period of observed trend]		
Desert Andes (17°S–31°S)	Huasco basin glaciers	29°S	5	-0.84 m (w.e.) year <sup>-1</sup> [2003/2004–2007/2008]	Nicholson et al. (2009); Gascoïn et al. (2011); Rabatel et al. (2011)	
Central Andes (31°S–36°S)	Piloto/Las Cuevas	32°S	5	-10.50 m (w.e.) [last 24 years]	Leiva et al. (2007)	
			Aconcagua basin glaciers	33°S	3	-20% [last 48 years]
	3	-14% [1955–2006]				
	8	Significant decrease in Aconcagua basin streamflow				
	Central Andes glaciers	33°S–36°S	3	-3% [since 1955]	Le Quesne et al. (2009)	
			4	-50 to -9 m year <sup>-1</sup> [during 20th century]		
			5	-0.76 to -0.56 m (w.e.) year <sup>-1</sup> [during 20th century]		
	Central Andes			1	+122 ± 8 m (winter) and +200 ± 6 m (summer) [1975–2001]	Carrasco et al. (2005)
	Snowpack	30°S–37°S	6	Positive, though nonsignificant, linear trend [1951–2005]	Masiokas et al. (2006); Vich et al. (2007); Vicuña et al. (2013)	
			8	Mendoza River streamflow: possible link to rising temperatures and snowpack/glacier effects. Not conclusive; increase in high and low flows possibly associated with increase in temperature and effects on snowpack		
Morenas Coloradas rock glacier	32°S–33°S		7	Significant change in active layer possibly associated with warming processes	Trombotta and Borzotta (2009)	
Cryosphere in the Andes of Santiago	33.5°S		5	Expansion of thermokarst depressions	Bodin et al. (2010)	
Basins	28°S–47°S		8	Non-significant increase in February runoff; possible increase of glacier melt [1950–2007]	Casassa et al. (2009)	
	30°S–40°S		8	Significant negative timing trend (centroid timing date shifting toward earlier in the year) for 23 out of the 40 analyzed series	Cortés et al. (2011)	
Patagonian Andes (36°S–55°S)	Basins	28°S–47°S	8	Not significant increase in February runoff trends that might suggest an increase of glacier melt in the Andes [1950–2007]	Casassa et al. (2009)	
	Northwest Patagonia	38°S–45°S	4	Recession of six glaciers based on aerial photograph analysis	Masiokas et al. (2008)	
	Proglacial lakes	40°S–50°S	8	Summertime negative trend on lakes indicating that melt water is decreasing	Pasquini et al. (2008)	
	Casa Pangue glacier	41°S	5	-2.3 ± 0.6 m (w.e.) year <sup>-1</sup> [1961–1998]	Bown and Rivera (2007)	
			4	-3.6 ± 0.6 m year <sup>-1</sup> [1981–1998]		
	Manso Glacier	41°S		8	Reduction in discharge associated with reduction in melt and precipitation	Pasquini et al. (2013)
	Patagonian Ice Field	47°S–51°S		5	-1.6 m (w.e.) year <sup>-1</sup> or -27.9 ± 11 km <sup>3</sup> (w.e.) year <sup>-1</sup> [2002–2006]	Chen et al. (2007)
	Northern Patagonian Ice Field	47°S		8	Glacial lake outburst flood possible response to retreat of Calafate glacier [20th century]	Harrison et al. (2006)
	Southern Patagonian Ice Field	48°S–51°S		4	Larger retreating rates observed on the west side coinciding with lower elevations of equilibrium line altitudes	Barcaza et al. (2009)
	Northern Patagonian, Southern Patagonian, and Cordillera Darwin ice fields	47°S–51°S, 54°S		4	5.7 to 12.2 km [1945–2005]	Lopez et al. (2010)
	Gran Campo Nevado	53°S	4	-2.8% of glacier length per decade [1942–2002]	Schneider et al. (2007)	
			3	-2.4% per decade [1942–2002]		
	Cordón Martial glaciers	54°S		5	Slow retreat from late LIA. Acceleration started 60 years ago.	Sterlin and Iturraspe (2007)



**Figura 3.** Modelación del número promedio de semanas por año cuando el Sistema Maipo de la compañía Aguas Andinas falla debido a la reducción del caudal promedio (medido en El Manzano) debajo de 50 m<sup>3</sup>/s en invierno. El grafico presenta los resultados para cinco escenarios pertenecientes a tres simulaciones de cambio climático (una simulación optimista, RCP 4.5; intermedia, RP 6.0; y pesimista, RP 8.4), demostrando que en 11 de los 15 escenarios considerados, existe un impacto en la operación del sistema. Fuente: Vicuña (2016: diap. 35).

### Los glaciares y la minería

Como destaca la literatura científica arriba citada, el cambio climático podrá tener serias consecuencias para los glaciares y, por extensión, la seguridad hídrica y estabilidad socioeconómica de las zonas semiáridas de Chile. Sin embargo, existe otra importante amenaza que esta literatura no considera: la actividad minera. Los geógrafos Alexander Brenning y Guillermo Azócar han realizado extensas investigaciones de los impactos de la minería sobre los glaciares rocosos, principalmente en Chile Central (Brenning, 2008; Azócar y Brenning, 2008; Brenning y Azócar, 2010). Como sus resultados ya han sido discutido en varias publicaciones de índole político (p. ej. Borquez et al., 2006; Chile Sustentable, 2013; Berland y Larraín, 2016), solo se presenta una síntesis a continuación.

Brenning y Azócar (2010: pp.145-147) describen tres practicas mineras que directamente amenazan los glaciares: (1) su remoción completa o parcial; (2) la creación de depósitos de lastre y desechos sobre los glaciares; y (3) la construcción de caminos y otra infraestructura encima de ellos. Los impactos medioambientales y económicos de estas prácticas y la cantidad de hielo que han afectado en ocho faenas mineras se resumen en los Cuadros 3 y 4 respectivamente. En total, se calcula que hasta la fecha un área de 3,3 km<sup>2</sup> de glaciares

rocosos ha sido intervenida de esta forma en las ocho faenas—el equivalente de por lo menos 25 millones de m<sup>3</sup> de agua, y hasta 34,7 millones de m<sup>3</sup>. Cabe destacar que casi dos tercios de todas las intervenciones enumeradas no fueron declaradas en las Evaluaciones de Impacto Ambiental de las compañías mineras (véase última columna de Cuadro 4), lo que significa que no han recibido aprobación ni regulación oficial.

Brenning y Azocar también evalúan las consecuencias de la sobrecarga de los glaciares con lastre para su estabilidad. Señalan que, en las faenas de Los Bronces y División Andina en el noreste de la Región Metropolitana, la velocidad de desplazamiento de algunos glaciares, que típicamente es inferior a 4 m por año, llegó a más de 25 m anuales después de la depositación de material. En estos casos, la práctica resultó contraproducente y hasta costosa, obligando el abandono de planes de depositar material adicional, la remoción de material ya depositado y el monitoreo permanente de las laderas para detectar potenciales fallas (Brenning y Azócar, 2010: pp.151-152). De hecho, el derrumbe de laderas como resultado de la desestabilización de glaciares representa un riesgo serio. La historia demuestra que derrumbes de este tipo podrían generar movimientos de masas catastróficas que afectan no solo las zonas mineras locales, sino grandes extensiones de las cuencas también. Dos eventos análogos en Chile central son la falla de una presa en la faena de La Disputada en 1965, que mató a 200 personas, y un deslizamiento de tierra natural de 30 mega-toneladas en la cordillera del río Colorado en 1987, que produjo flujos de lodo y roca hasta 40 km en el valle abajo, cobrando 43 vidas (Brenning, 2008: pp.200-201; Brenning y Azócar, 2010: pp. 152, 155).

Y hay otros impactos de las prácticas mineras con un amplio alcance. En el largo plazo, afirman Brenning y Azócar, las cuencas en que se ubican glaciares intervenidos estarán sujetas a efectos geoquímicos relacionados con el derretimiento de hielo contaminado (Drenaje Acido de Roca), así como a movimientos en masa y erosión de material anteriormente resguardado por glaciares. Estos fenómenos afectarán a recursos hídricos superficiales y subterráneos mediante procesos como la dispersión de aguas contaminadas, flujos detríticos y aluviones causados por el desequilibrio de regímenes hidrográficos—lo que de alguna forma o otra desestabilizará a ecosistemas y perjudicará a zonas pobladas a lo largo de las cuencas afectadas (Brenning y Azócar, 2010: p. 155).

Es preocupante que a pesar de dichos efectos potencialmente desastrosos, el Servicio de Evaluación Ambiental de Chile sigue considerando nuevos proyectos que proponen la destrucción de glaciares en las cabeceras de cuencas de las zonas más pobladas del país. Por ejemplo, las Evaluaciones de Impacto Ambiental publicadas en 2013 para la expansión de la faena de División Andina revelan que el proyecto pretendía intervenir en más de 25 glaciares, mediante las prácticas de remoción directa, depositación de lastre y/o la construcción de caminos (CODELCO-GAC, 2013).

**Cuadro 3.** Tipología de intervenciones mineras en glaciares rocosos y sus posibles consecuencias.

Fuente: Brenning y Azócar (2010: Cuadro N°1, p.145).

Tipo de intervención	Posibles consecuencias ambientales	Posibles consecuencias económicas	Efectos en el tiempo
Remoción completa o parcial de glaciares rocosos	Pérdida de un reservorio de hielo subterráneo fósil, reducción de caudales de ríos Alteración irreversible del paisaje	Disponibilidad reducida de agua en la cuenca Reducción del valor turístico del paisaje	Cambio inmediato Cambio inmediato
Creación de depósitos de lastre sobre glaciares rocosos	Aceleramiento, inestabilidad y posible colapso de glaciares rocosos  Contaminación de agua almacenada en glaciares rocosos como consecuencia del <i>Acid Rock Drainage</i> (ARD)  Degradación del permafrost y posible inestabilidad de glaciares rocosos como consecuencia de la producción de calor en reacciones exotérmicas del ARD  Degradación basal del permafrost de glaciares rocosos por efecto del gradiente térmico; posible inestabilidad basal	Riesgo para vidas humanas e infraestructura minera y pública; necesidad de monitoreo y control  Necesidad de monitoreo y tratamiento del agua; mayor escasez de agua  Riesgo para vidas humanas e infraestructura minera y pública  Riesgo para vidas humanas e infraestructura minera y pública	Meses a décadas  Años a décadas  Años a décadas  Décadas a siglos
Construcción de caminos sobre glaciares rocosos	Degradación superficial del permafrost por la alteración de propiedades físicas superficiales como el albedo y la conductividad térmica  En caso de accidentes, contaminación con sustancias tóxicas transportadas (por ejemplo combustible)	Peligro para usuarios del camino  Disponibilidad reducida de agua en la cuenca; necesidad de monitoreo	Años a décadas  Meses a años

**Cuadro 4.** Área glaciaria intervenida y equivalente en agua afectada en ocho faenas: Codelco División Andina y los Bronces, noreste de la Región Metropolitana; Los Pelambres, sureste de la Región de Coquimbo; Pascua-Lama, sureste de la Región de Atacama; Pimentón, noreste de la Región de Valparaíso; Codelco División El Teniente y Catedral, noreste de la Región de O'Higgins; Cerro Casale, centro-este de la Región de Atacama. Fuente: Brenning y Azócar (2010: Cuadro N°2, p.150).

Faena minera	Área original de glaciares rocosos (km <sup>2</sup> )	Área intervenida (o por intervenir) de glaciares rocosos (km <sup>2</sup> )		Equivalente en agua de glaciares rocosos intervenidos (o por intervenir) (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )		Años de inicio de la intervención	Declarado en EIA o DIA <sup>a</sup>
		Remoción, depósito de lastre	Caminos, sondajes	Remoción, depósito de lastre	Caminos, sondajes		
Codelco División Andina	2,6	1,32	0,78 <sup>b</sup>	10-14	6-8	Desde antes de 1990	Sí (EIA 2001)
Los Bronces	1,9	0,4	0,4	3-4	3-4	Desde antes de 1990	No
Los Pelambres	0,4	0,1	0,1	0,8-1,3	1-1,6	2003-2004	No
Pascua-Lama	0,3	0,03	-	0,2-0,4	-	A partir de 2013	Sí (EIA 2004-2006)
Pimentón	>1,6	-	0,06	-	0,4-0,6	Desde antes de 1996	No
Codelco División El Teniente	n.d.	-	0,04	-	0,3-0,4	Antes de 1997	No
Catedral	2,3	-	0,03	-	0,2-0,3	Entre 1996 y 2001	No
Cerro Casale	0,1	-	0,01	-	0,1	Desde antes de 1999	No

<sup>a</sup> "No": proyecto no tiene DIA/EIA, intervenciones se produjeron antes de la introducción del SEIA, o proyecto tiene DIA/EIA pero no anuncia intervenciones en glaciares rocosos.

<sup>b</sup> Incluye áreas de depósitos de lastre sobre glaciares rocosos.

n.d.: no determinado

Fuente: Elaboración propia.

## **Evaluación y conclusiones**

Chile es un país de cordillera. El 63,8% (477.671 km<sup>2</sup>) de su territorio continental corresponde a zonas montañosas, lo que implica que el país depende en gran parte del derretimiento de nieves y hielo a la altura para la provisión de agua (Segovia, 2015: p.521). Los glaciares, de los cuales existen más de 24 mil en Chile y la gran mayoría de todos en Sudamérica, representan un fundamental componente de este régimen hidrológico. Son especialmente cruciales en las regiones semiáridas de Chile Central y el Norte Chico, donde prevalece una situación de estrés hídrico ligado a las mínimas precipitaciones del verano, la presencia de más de la mitad de la población nacional y una alta demanda de agua para actividades industriales, agrícolas y recreativas.

Existe una sólida base científica que demuestra la importancia del aporte hídrico de los glaciares en estas regiones durante la estación seca y especialmente bajo condiciones de sequía. Los resultados indican que en las sub-cuencas de algunos de los principales ríos que abastecen la Región Metropolitana, el deshielo de glaciares puede llegar a un 30-50% del caudal de verano, y en algunos casos hasta un 70-90%. Además, una reciente valoración revela que los glaciares brindan, de una forma regular anual, servicios ecosistémicos equivalentes a miles de millones de pesos. A pesar de esta visible importancia, y a pesar de la presencia de una notable concentración de glaciares en la cordillera central y norte-central, Chile no cuenta en la actualidad con un marco legal que explícitamente garantice la protección de estas reservas de agua. Es un hecho especialmente inquietante el que en dichas zonas del país se encuentra una exigua área englaciada bajo la jurisdicción del SNASPE (un sistema semi-oficial para la administración de áreas de conservación), mientras que en las seis regiones que van entre Atacama y el Maule, no existe ningún glaciar ubicado dentro de un Parque Nacional (Figura 1).

El aporte hídrico de los glaciares es aún más crucial en el contexto del cambio climático—fenómeno que se asocia con un descenso promedio de las precipitaciones, mayor probabilidad de sequías y una subida de las temperaturas en Chile semiárido. Sin embargo, la relación entre los glaciares, el cambio climático y la seguridad hídrica no es así de simple. El calentamiento global también provocará una gradual, pero significativo deterioro de los glaciares. El IPCC pronostica un grave panorama de futura escasez de agua en el centro y norte del país resultante de la reducción de áreas englaciadas y otras alteraciones medioambientales, en el que figuran problemas de abastecimiento para grandes ciudades, el declive agrícola y económico, y grandes migraciones. A las mencionadas amenazas para la seguridad hídrica se suma la actividad minera. Mediante una serie de prácticas bien estudiadas, la minería sistemáticamente destruye varios glaciares en la región, efectivamente aumentando la vulnerabilidad hídrica de la sociedad. Y algunas de estas prácticas pueden tener otras perjudiciales consecuencias socio-económicas y ecológicas más allá de las faenas, como derrumbes catastróficos y la contaminación de cauces.

Los tres principales temas considerados en este informe—la importancia hídrica de los glaciares en Chile semiárido, las amenazas del cambio climático y la minería, y la severidad

del estrés hídrico en la zona—son ampliamente documentados en la literatura científica. Algunos aspectos de esta temática hasta se ha destacado en la política internacional por organizaciones como el IPCC. De esta forma, se puede afirmar que actualmente existe una inconcebible desconexión entre la legislación en torno a los glaciares y la realidad medioambiental y geográfica en la que Chile existe. Para maximizar la seguridad hídrica y estabilidad socioeconómica de Chile semiárido, será imprescindible una legislación que maximice la preservación de los glaciares en la región. Como sugiere Segovia (2015), garantizar la protección solo de los que se sitúan en parques nacionales o áreas del SNASPE es poner en juego una esencial fuente del agua dulce que sostiene la vida y actividad comercial en la zona más demográfica, económica y políticamente importante del país. Dado la magnitud de los riesgos asociados, la noción de proteger cualquier otra fracción minoritaria de los glaciares en la región también parece una política cuestionable en vista de la evidencia científica.

### Referencias

- Azócar, G.F. y Brenning, A. (2008) Intervenciones en glaciares rocosos en Minera Los Pelambres, Región de Coquimbo, Chile. Waterloo: University of Waterloo, informe técnico.
- Berland, A.J. y Larraín, S. (2016) Glaciares Chilenos: reservas de agua estratégicas, sin embargo amenazadas. Un resumen de recientes resultados del IPCC, PNUMA y otras investigaciones. Santiago: Chile Sustentable.
- Bodin, X., Rojas, F. y Brenning, A. (2010) Status and evolution of the cryosphere in the Andes of Santiago (Chile, 33.5°S). *Geomorphology*, 118: pp.453-464.
- Bórquez, R., Larraín, S., Polanco, R. y Urquidí, J.C. (2006) *Glaciares chilenos: reservas estratégicas de agua dulce para la sociedad, los ecosistemas y la economía*. Santiago: LOM Ediciones.
- Brenning, A. (2008) The impact of mining on rock glaciers and glaciers: examples from Central Chile. En: Orlove, B.S.; Wiegandt, E. y Luckman, B. (eds.) *Darkening peaks: glacier retreat, science, and society*. Berkeley: University of California Press: pp.196-205.
- Brenning, A. y Azócar, G.F. (2010) Minería y glaciares rocosos: impactos ambientales, antecedentes políticos y legales, y perspectivas futuras. *Revista de Geografía Norte Grande*, 47, pp.143-158.
- Bridge, J.S. y Demicco, R.V. (2008) *Earth surface processes, landforms and sediment deposits*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Brown F, Rivera A, Acuña C. (2008) Recent glacier variations at the Aconcagua basin, central Chilean Andes. *Annals of Glaciology*, 48: pp.43–8.
- Castillo, Y., McPhee, J. y Escobar, M. (2014) Diferencias en modelación glacio-hidrológica en cuencas con glaciares blancos y cubiertos. Presentación en el XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Santiago de Chile, Agosto 2014.
- Chile Sustentable (2013) Glaciares y minería: continúa la destrucción de los glaciares. Santiago: Chile Sustentable. Disponible en <http://www.chilesustentable.net/glaciares-y-mineria/>.



- CODELCO-GAC (2013) Capítulo 4: evaluación de impactos ambientales (Rev.1). Evaluaciones de Impacto Ambiental de 'Proyecto Expansión Andina 244', por la Corporación Nacional del Cobre de Chile and Gestión Ambiental Consultores. Disponible en: <http://infofirma.sea.gob.cl/DocumentosSEA/MostrarDocumento?docId=35/00/63be0dd739b2f94e69e6caaa9c3164412899>.
- DGA (2014) Glaciología y la Ley sobre Glaciares. Presentación de la Unidad de Glaciología y Nieves de la Dirección General de Aguas de Chile, Octubre 2014.
- IPCC (2007) *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden y C.E. Hanson (eds.)] Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)] Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC (2014) *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, y L.L.White (eds.)] Cambridge: Cambridge University Press.
- Le Quesne, C., Acuña, C., Boninsegna, J.A., Rivera, A. y Barichivich, J. (2009) Long term glacier variations in the Central Andes of Argentina and Chile, inferred from historical records and tree-ring reconstructed precipitation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3-4): pp. 334-344.
- McPhee, J., Castillo, Y., Bustos, E. y Vicuña, S. (2015) Vulnerabilidades en la cordillera de la cuenca del Maipo y los impactos del Cambio Climático. Boletín del Proyecto MAPA, Maipo: Plan de Adaptación, Newsletter #5: pp.8-9.
- Ohlanders, N., Rodriguez, M. y McPhee, J. (2013) Stable water isotope variation in a Central Andean watershed dominated by glacier and snowmelt. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17: pp.1035-1050.
- Pellicciotti, F., Ragettli, S., Carenzo, M., McPhee, J. (2014) Changes of glaciers in the Andes of Chile and priorities for future work. *Science of the Total Environment*, 493: pp.1197-1210.
- 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 (Proceedings of the Vancouver Symposium, August 1987)*, IAHS Publ. no. 166: pp.161-172.
- Pourrier, J., Jourde, H., Kinnard, C., Gascoïn, S. y Monnier, S. (2014) Glacier meltwater flow paths and storage in a geomorphologically complex glacial foreland: The case of the Tapado glacier, dry Andes of Chile (30°S). *Journal of Hydrology*, 519: pp.1068-1083.

- Ragetti, S. y 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, W03509.
- Rivera, A., Acuña, C., Casassa, G. y Bown, F. (2002) Use of remote sensing and field data to estimate the contribution of Chilean glaciers to the sea level rise. *Annals of Glaciology*, 34: pp.367-372.
- 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 Magíster, Universidad de Chile.
- Segovia, A. (2015) Glaciares en el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas por el Estado (SNASPE). *Investigaciones Geográficas de Chile*, 49: pp.51-68.
- Vicuña, S. (2016) Vulnerabilidad y adaptación a la variabilidad y al cambio climático en la Cuenca del Río Maipo en Chile Central. Seminario Cierre Proyecto MAPA, presentado en el Centro de Extensión, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, 19 Enero 2016.