

EL CAMBIO CLIMÁTICO Y LA CRIÓSFERA ANDINA





EL CAMBIO CLIMÁTICO Y LA CRIÓSFERA ANDINA

Fundación Ambiente y Recursos Naturales - FARN

FARN es una organización no gubernamental, sin fines de lucro y apartidaria, fundada en 1985. Su objetivo principal es promover el desarrollo sostenible a través de la política, el derecho y la organización institucional de la sociedad. Su trabajo se dirige, principalmente, a quienes toman decisiones, tanto en el ámbito público, como privado y a la construcción de una ciudadanía democrática y participativa. Para eso, promueve el acceso a la información pública y a la justicia. Lo hace a través de la incidencia política, institucional y social en la agenda pública ambiental. La participación de la ciudadanía es uno de los ejes principales del trabajo de FARN, porque son quienes deben cumplir y hacer cumplir las leyes, consensuar políticas y destinar recursos para prevenir los problemas ambientales. Las actividades de la Fundación se financian gracias al aporte de donantes individuales, empresas, fundaciones extranjeras y nacionales, como así también de organismos públicos nacionales e internacionales.

Autora y editora

Catalina María Gonda (FARN)

Revisores internos

Pía Marchegiani (FARN) y Leandro Gómez (FARN)

Revisor externo

Roque Pedace (CAN-LA)

Este reporte fue elaborado con la ayuda de AirClim - Secretaría de Contaminación Atmosférica y Clima de Suecia

Cita

Gonda, C. 2019. El Cambio Climático y La Criósfera Andina. Fundación Ambiente y Recursos Naturales (FARN)

Diseño

Lucila Gallegos - info@lucilagallegos.com

MENSAJES DESTACADOS

La criósfera es un componente fundamental de la cordillera de los Andes.

Los glaciares, superficies nevadas y el permafrost representan una fuente crítica de agua dulce contribuyendo de manera crucial a la sustentabilidad de las actividades socioeconómicas de las poblaciones andinas. A su vez, los glaciares juegan un papel muy importante en el ciclo hidrológico actuando como reservas y amortiguadores para los asentamientos humanos y los ecosistemas naturales.

El cambio climático afecta y seguirá afectando fuertemente a las montañas andinas.

El aumento de la temperatura y los cambios en el patrón de precipitaciones en los Andes están llevando a una reducción en la acumulación de hielo y acelerando la disminución de glaciares y cubiertas de nieve.

Los glaciares andinos se encuentran entre los que se están derritiendo más rápidamente y son los que más contribuyen al aumento del nivel del mar en todo el planeta.

En los Andes del sur la velocidad de este retroceso fue más alta que cualquier otra región montañosa del mundo. También se ven fuertemente afectados aquellos glaciares de menor altitud en los Andes Tropicales.

La desaparición de glaciares y superficies nevadas traerá graves consecuencias para la región.

Cambios en los regímenes hidrológicos, escasez de agua, deslizamientos de roca, inundaciones, aumento del nivel del mar, pérdida de biodiversidad y servicios ecosistémicos son algunas de las consecuencias que enfrenta la región Andina y estas se irán agravando a lo largo del siglo si no se toman medidas apropiadas.

Aumentar la ambición de los compromisos de mitigación a nivel mundial es crucial para salvaguardar el futuro de los glaciares y evitar una desglaciación irreversible a gran escala.

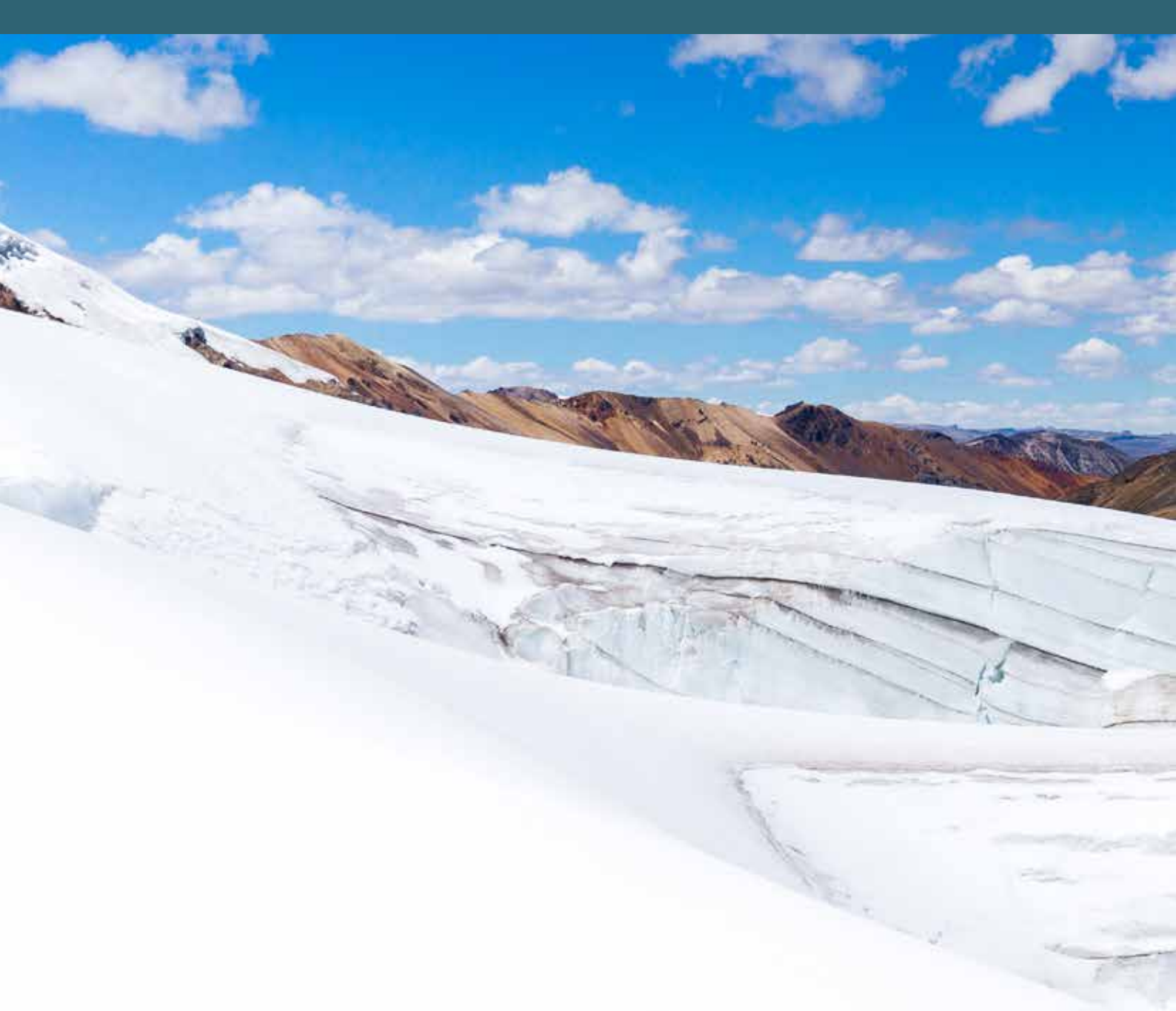
La magnitud y velocidad del deshielo depende de qué tanto se logren reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en las próximas décadas.

Los países andinos deberán adaptarse a los cambios que ocasionará el derretimiento de la criósfera.

Existe una necesidad de implementar de forma inmediata estrategias de adaptación involucrando a diversos actores a nivel internacional, nacional y sub-nacional, e integrando conocimiento científico, ancestral y local. También resulta urgente y necesario que los países andinos avancen en la realización de inventarios y en la discusión sobre políticas públicas y regulaciones para proteger a los glaciares de otras amenazas como las actividades mineras.

CONTENIDOS

Introducción	08
1: Los Andes	10
2: El rol y la importancia de la criósfera en los en los Andes y el mundo	12
Box 1: ¿A qué llamamos glaciar? ¿Qué es un campo de hielo?	13
Regulación del sistema climático global	13
Regulación hídrica	14
Reservas de agua dulce	14
Box 2: Glaciares y actividades humanas	16
3: Glaciares Andinos	18
Andes Tropicales	19
Andes del sur	25
4: Los Impactos del cambio climático en la criósfera andina	30
Cambio climático	31
Los Andes en un clima cambiante	31
Proyecciones climáticas para los Andes	32
Impactos observados del cambio climático en la criósfera andina	33
¿Qué sucederá con los glaciares andinos en el futuro?	35
Box 3: Cada grado importa: La importancia de reducir las emisiones a nivel global.	36
Otras amenazas: la minería	37
5: Consecuencias	38
Suministro de agua dulce	40
Aumento del nivel del mar	40
Box 4: Contribución Andina al aumento del nivel del mar	41
Pérdida de servicios ecosistémicos y biodiversidad	41
Inundaciones, deslizamientos y avalanchas	44
Actividades económicas y energía	44
6: Políticas y Protección: ¿son suficientes?	46
Box 5: La Ley de Glaciares de Argentina	47
7: El camino por recorrer: desafíos y oportunidades	50
Referencias	56



INTRODUCCIÓN

La criósfera juega un rol fundamental sobre los sistemas físicos, biológicos y sociales de una gran parte de la superficie de nuestro planeta. Los glaciares y las superficies congeladas desempeñan una función importante en el sistema climático global a través de complejos mecanismos de retroalimentación, regulando al mismo tiempo el ciclo hidrológico y el nivel del mar.

Dado que todos sus componentes están sujetos inherentemente a cambios en la temperatura y precipitaciones, la criósfera es un integrador natural de la variabilidad del clima y proporciona algunas de las consecuencias más evidentes del cambio climático antropogénico.

Prácticamente todos los glaciares monitoreados a nivel global han retrocedido a causa del aumento de la temperatura atmosférica. Gracias al hombre, muchos glaciares están fuera de equilibrio con el contexto climático actual y por lo tanto, comprometidos a perder una masa considerable en el futuro, incluso si la temperatura media actual se mantuviera estable. Si no se toman medidas adecuadas, los impactos desencadenados por los cambios que experimenta la criósfera pueden volverse irreversibles en escalas temporales relevantes para las sociedades humanas.

La pérdida de glaciares, así como también los cambios en la cubierta de nieve estacional, tiene impactos directos sobre la disponibilidad de los recursos hídricos, afectando a muchas comunidades y ecosistemas. A causa de este deshielo generalizado, las altas montañas del mundo están experimentando una transformación ambiental a gran escala sin precedentes, que conlleva impactos profundos y de gran alcance y que incluso involucran procesos que amplifican el calentamiento global.

Las montañas de los Andes no son la excepción, y sus glaciares se están retirando a una de las tasas más rápidas del mundo. En algunas áreas, han desaparecido por completo. Las masas de hielo que aún persisten continuarán retrocediendo a lo largo del siglo y la existencia de muchos peligra, poniendo en riesgo a los ecosistemas y sociedades que dependen de ellos para subsistir.

El reciente informe especial del Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC) sobre cambio climático y su influencia en los océanos y la criósfera (SROCC) recopila la mejor ciencia disponible respecto al retroceso de los glaciares y deshielos a nivel mundial¹. Este reporte busca ampliar esta información a nivel regional, plasmando la importancia y estado de situación de la criósfera de los Andes en un clima cambiante.

La evidencia científica nunca ha sido tan contundente respecto a las consecuencias de nuestras acciones sobre el ambiente. A medida que el paisaje responde ante el cambio climático, se nos acaba el tiempo para actuar. Esperamos que este breve reporte llame la atención de quienes toman decisiones, representantes del sector privado, sociedad civil y habitantes de los países andinos sobre la importancia de tomar medidas inmediatas y colectivas para el resguardo y protección de su criósfera.

LOS ANDES



Picos nevados de la Cordillera Real, en La Paz, Bolivia.

01.

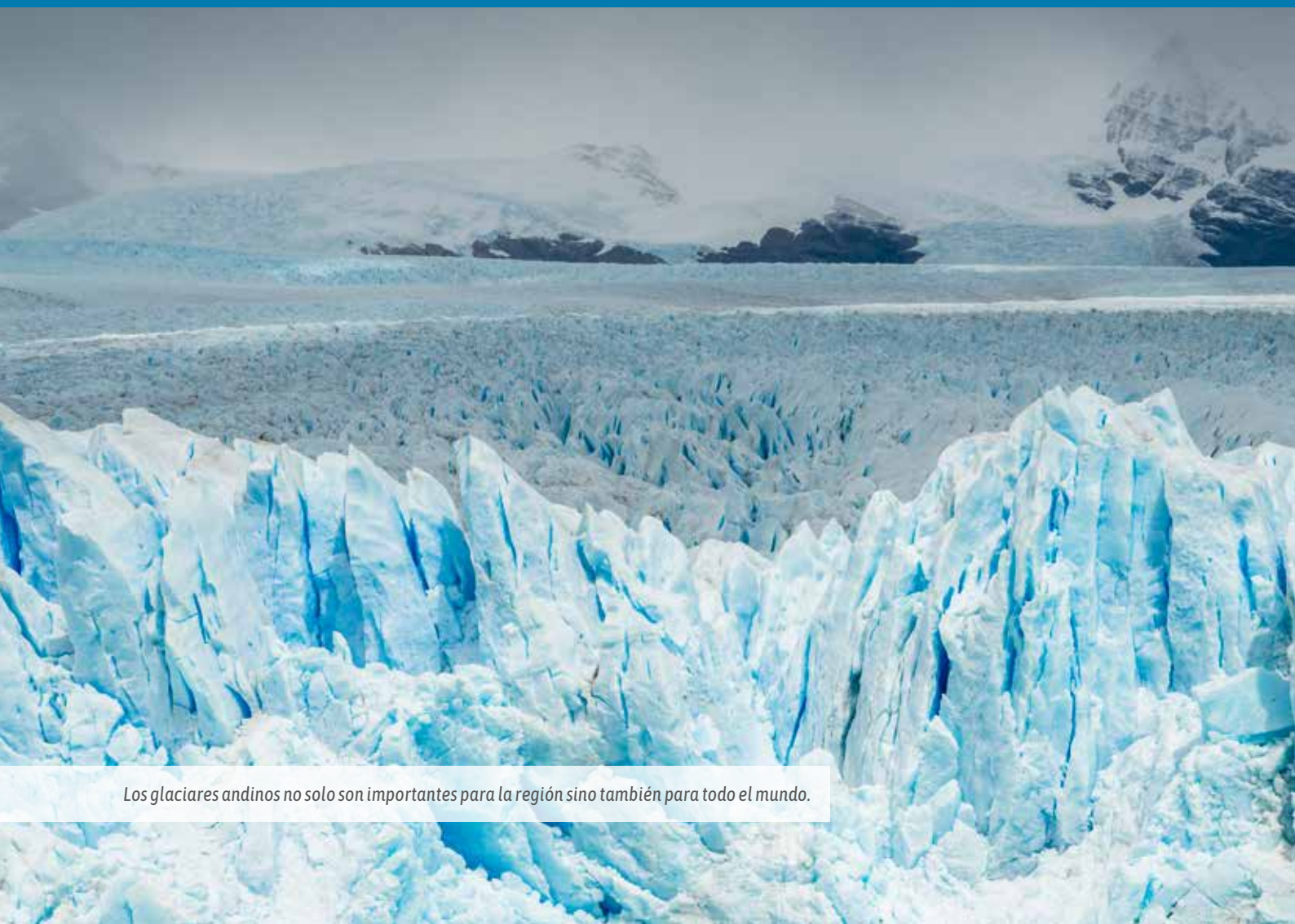
La cordillera de los Andes es la cadena montañosa más importante de Sudamérica y se extiende desde el occidente de Venezuela hasta el sur de Argentina y Chile, atravesando los territorios de Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia. Ocupan más de 2.500.000 km² y albergan una población cercana a 85 millones (45% de las poblaciones totales de los países), siendo la parte norte de los Andes una de las regiones de montaña más densamente poblada del mundo². Al menos otras 20 millones de personas que habitan las grandes ciudades a lo largo de la costa del Pacífico en América del Sur dependen también de los recursos de las montañas y de sus servicios ecosistémicos.

Muchas ciudades de esta cadena montañosa se ubican a la rivera de ríos cuyos caudales se encuentran dominados por el derretimiento estacional de la nieve acumulada durante el invierno y el aporte de los glaciares de montaña de la región. El consumo urbano, las industrias y la agricultura dependen del agua proveniente de estos ríos.

Gran parte de las personas que habitan las regiones montañosas viven por debajo de la línea de pobreza y factores como el manejo no sostenible de la tierra, la creciente urbanización y el cambio climático amenazan seriamente la sostenibilidad del desarrollo de la región².

Los glaciares de montaña y el derretimiento de la nieve estacional son fuentes críticas de agua que contribuyen de manera crucial a la sustentabilidad de las actividades socioeconómicas de las poblaciones de la región Andina. Su desaparición conlleva fuertes implicancias ecológicas y sociales para los países de esta región: no sólo se verán afectados los paisajes y los ecosistemas, sino que también sus habitantes, infraestructura y desarrollo regional.

EL ROL Y LA IMPORTANCIA DE LA CRIÓSFERA EN LOS ANDES Y EN EL MUNDO



Los glaciares andinos no solo son importantes para la región sino también para todo el mundo.

02.

La criósfera incluye todas las regiones de la Tierra y el océano donde el agua se encuentra en estado sólido. Ésta comprende varios componentes: zonas nevadas, ríos, lagos, mantos y plataformas de hielo, hielo marino, glaciares y casquetes polares y el suelo congelado que existe tanto sobre la superficie terrestre (como el permafrost) como debajo de los océanos³.

Los glaciares, junto con los casquetes polares, son la principal reserva estratégica de agua dulce en el planeta, funcionando como fuente de recarga de ríos, lagos y napas subterráneas en las regiones áridas y durante períodos de sequía. Además de su importancia en el ciclo hidrológico, ejercen un rol crítico sobre el sistema climático global y el nivel del mar a través de complejos mecanismos de retroalimentación.

¿A QUÉ LLAMAMOS GLACIAR? ¿QUÉ ES UN CAMPO DE HIELO?

Los **glaciares** son masas perennes de hielo que se forman sobre la superficie terrestre por la acumulación y compresión de nieve, en un proceso que transcurre a lo largo de muchos años. Son cuerpos dinámicos que fluyen lentamente pendiente abajo como ríos congelados. El hielo que existe en un glaciar puede tener desde cientos o miles de años (por ejemplo los de la Patagonia) hasta millones de años como los casquetes de la Antártica y Groenlandia³.

Por otra parte, los **campos de hielo** son grandes áreas de glaciares interconectados, que generalmente se encuentra en una región montañosa y cuya topografía está determinada por las formas de relieve circundantes. Su tamaño es mayor que el de los glaciares alpinos, pero son más pequeños que los casquetes de hielo y las capas de hielo⁴.

REGULACIÓN DEL SISTEMA CLIMÁTICO GLOBAL

La criósfera juega un papel fundamental en la regulación del sistema climático global. La nieve y el hielo tienen un alto albedo (reflectividad), es decir, reflejan hasta un 90% de la radiación solar incidente (comparado con el 31% de promedio global) regulando así la temperatura atmosférica. Las superficies oscuras tienen un albedo bajo (absorben energía y se calientan) mientras que las superficies blancas tienen un albedo alto, reflejando una gran parte de la energía solar hacia el espacio. Cuanto más aumenta la temperatura atmosférica, los glaciares se reducen y las capas de nieve desaparecen haciendo que el suelo oscuro circundante absorba más radiación, provocando un mayor calentamiento que a su vez refuerza este derretimiento (retroalimentación positiva). Al mismo tiempo, este proceso de retroalimentación acelera el calentamiento global.

La criósfera juega un rol fundamental en la regulación térmica del planeta favoreciendo el mantenimiento de un rango de temperaturas adecuadas a nivel de la superficie terrestre.

REGULACIÓN HÍDRICA

Según las variaciones en la temperatura y precipitaciones a lo largo del año, los glaciares acumulan agua durante grandes nevadas y períodos más fríos y liberan masa por derretimiento durante los períodos más cálidos y secos, lo que proporciona un amortiguador contra la variabilidad estacional de la precipitación.

En otras palabras, los glaciares actúan como “esponjas” jugando un papel fundamental en la regulación de las cuencas hídricas: en períodos húmedos, el agua se acumula en estos cuerpos de hielo mientras que en los períodos secos, cuando el agua escasea, su derretimiento permite abastecer las cuencas hídricas dando sustento a ríos, lagos, lagunas y otros sistemas acuáticos terrestres.

En los Andes y en muchas llanuras costeras de la región, el agua de deshielo de los glaciares es una fuente sumamente importante de irrigación, energía hidroeléctrica y suministro de agua potable, en particular durante la estación seca y los períodos de sequía, jugando también un rol importante para la ecología de muchos humedales⁵⁻⁷.

RESERVAS DE AGUA DULCE

El agua dulce es probablemente el servicio ecosistémico más importante proporcionado por la criósfera en esta cadena montañosa. Los glaciares (descubiertos y cubiertos) y glaciares rocosos contienen, tanto en volumen como en superficie cubierta, prácticamente la totalidad de las reservas hídricas estratégicas en estado sólido de la Cordillera de los Andes.

El agua de deshielo juega un papel crucial en el suministro de agua dulce para 75 millones de personas que habitan en la región Andina, y para otros 20 millones de personas que viven río abajo. Alrededor del 2,2% del suministro de agua en Quito (Ecuador) y el 15% en La Paz (Bolivia) proviene de la escorrentía glaciar^{7,8}. En la región peruana de Ancash, los glaciares proporcionan hasta el 67% del suministro de agua durante la estación seca, y llega hasta el 91% durante las sequías extremas. Los glaciares que alimentan la cuenca del río Maipo, principal fuente de agua de la ciudad de Santiago de Chile, aportan el 67% del agua cuando finalizan los secos veranos⁹. Mendoza es la provincia argentina que tiene la mayor superficie de irrigación en los Andes Centrales de Argentina. El clima es árido y los recursos hídricos dependen principalmente del deshielo de la nieve y del deshielo de los glaciares de los Andes.

Para resaltar la importancia de los glaciares como reservas de agua dulce, cabe recordar que menos del 3% del total del agua existente en nuestro planeta corresponde a agua dulce. Más aún, la mayor parte de ese 3% es inaccesible: El 68% se encuentra congelada formando capas de hielo polares y glaciares y un poco más del 30% se encuentra en yacimientos subterráneos. Solo el 0,3% del agua dulce se halla en la superficie formando lagos, ríos y pantanos¹⁰.



Distribución del agua en el planeta¹⁰.



Los glaciares juegan un papel muy importante en la hidrología de los Andes, actuando como un amortiguador para los asentamientos humanos y los ecosistemas naturales.

Ventisquero Colgante en el Parque Nacional Queulat de Chile.

De estas cifras se desprende que la cantidad de agua disponible para el abastecimiento humano y ecosistémico es extremadamente limitada.

La disminución del agua proveniente del deshielo, las proyecciones climáticas, el aumento poblacional, la urbanización, el crecimiento de los sectores productivos y extractivos (agricultura a gran escala, minería) y las demandas crecientes de energía y electricidad indican que la competencia por el agua será cada vez más intensa en los países andinos¹¹.

Los glaciares de montaña y el derretimiento de la nieve estacional son fuentes críticas de agua que contribuyen de manera crucial a la sustentabilidad de las actividades socioeconómicas de las poblaciones de la región Andina.

GLACIARES Y ACTIVIDADES HUMANAS

Agricultura

El agua de deshielo de los glaciares no sólo garantiza el suministro de agua potable, sino también la estabilidad hidrológica para la agricultura en muchos valles andinos a lo largo de todo el año. Un ejemplo de ello es el valle del Santa en Perú, donde las amplias aguas de la Cordillera Blanca abastecen a los pueblos y a la agricultura de los valles montañosos de la llanura costera adyacente. El Valle Longitudinal de Chile (Depresión Intermedia), con su clima mediterráneo, subsiste del agua proveniente del deshielo de los glaciares andinos durante todo el año. En esta región el agua de deshielo constituye la base de una agricultura de riego intensiva orientada a la exportación¹².

Energía

La región Andina se ha vuelto altamente dependiente de la energía hidroeléctrica, que representa el 30% de la energía total en Argentina y Bolivia, más del 50% en Ecuador, y alrededor del 70% en Perú y Colombia. La escorrentía actual de muchas de estas cuencas incluye una contribución sustancial de los glaciares de alta montaña^{13,14}.

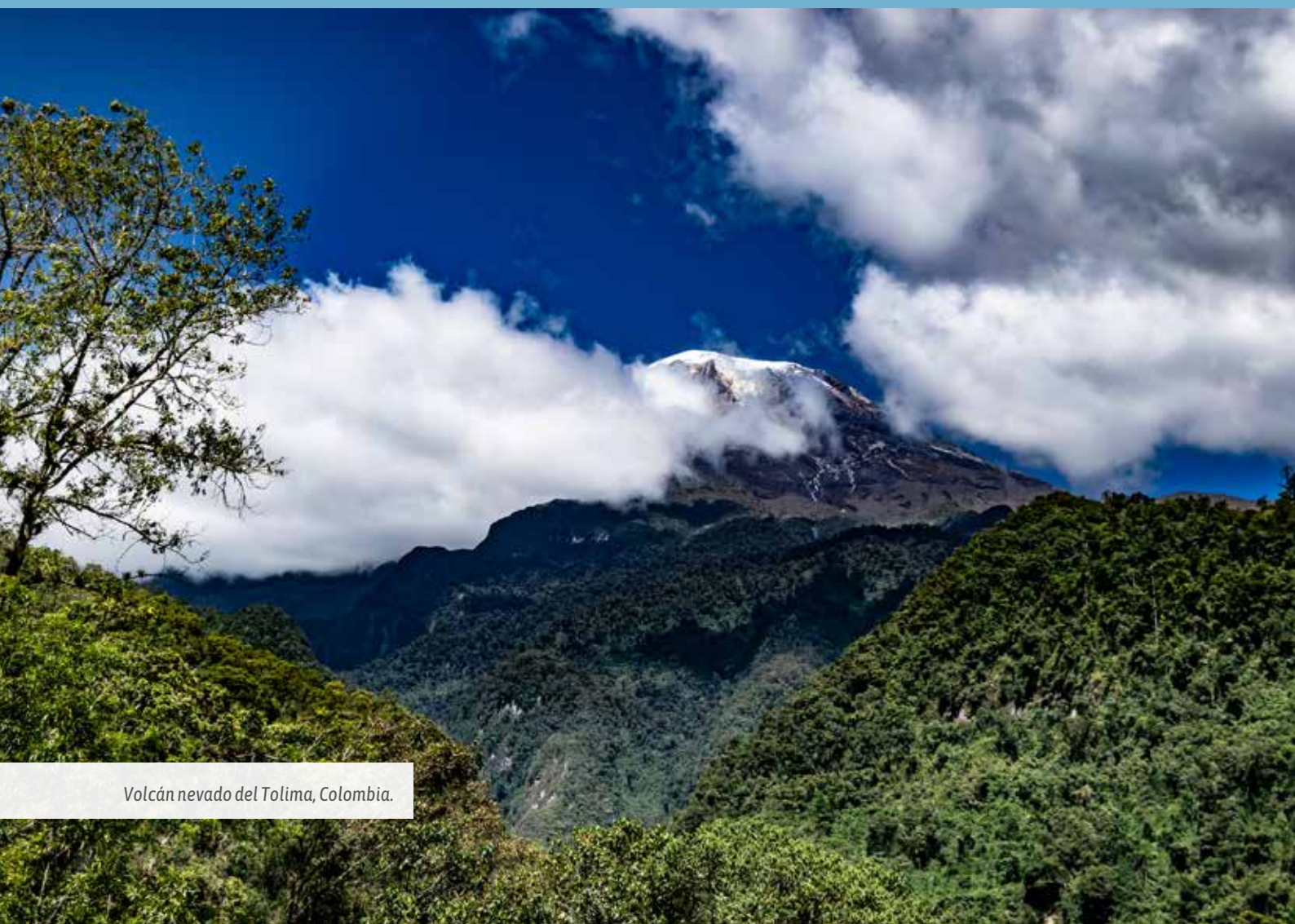
Turismo

Los glaciares andinos son un gran atractivo para los turistas nacionales e internacionales, trayendo beneficios económicos a las comunidades de montaña que los reciben. Por ejemplo, el Parque Nacional Los Glaciares en la Patagonia Argentina recibe alrededor de 450 mil visitantes por año, y el glaciar Pastoruri en Perú solía recibir 100 mil turistas por año en la década de los 90's brindando sustento a miles de habitantes de la Cordillera Blanca.



Turistas caminan sobre un glaciar patagónico.

GLACIARES ANDINOS



Volcán nevado del Tolima, Colombia.

03.

Con un número de aproximadamente 18.799 glaciares (Inventario de Glaciares Randolph de 2017) los Andes albergan el área glaciaria más grande del hemisferio sur fuera de la Antártida.

La amplia variedad de condiciones topográficas y climáticas de esta cordillera dan lugar a una gran diversidad de masas de hielo. Los glaciares andinos cubren una amplia gama de altitudes, desde los picos más altos y volcanes de más de 6.000 m sobre el nivel del mar en los Andes Tropicales y Ecuatoriales hasta el nivel del mar en la Patagonia y Tierra del Fuego. La mayor parte se encuentra a lo largo de la frontera entre Argentina y Chile, y tan solo una pequeña proporción se encuentra en los Andes Tropicales (desde Venezuela hasta Bolivia). Estos últimos constituyen más del 95% de los glaciares tropicales del mundo¹⁵.

ANDES TROPICALES

Venezuela

En el año 1952 podían encontrarse 10 glaciares en las montañas de Venezuela. Un reciente inventario encontró que actualmente solo queda uno: el glaciar Humboldt¹⁶. Este glaciar se encuentra en la ladera noroeste de Pico Humboldt, el segundo pico más alto de Venezuela (4942 m.s.n.m.).

Colombia

En Colombia, los pequeños glaciares o nevados que aún persisten se ubican sobre los picos montañosos por encima de los 4850 m.s.n.m, cubriendo aproximadamente 37 km². En la actualidad, solo existen 6 glaciares, de los cuales 4 coronan las cumbres de volcanes activos: Sierra Nevada de Santa Marta, Sierra Nevada El Cocuy o Güicán, Volcán Nevado del Ruiz, Volcán Nevado Santa Isabel, Volcán Nevado del Tolima y Volcán Nevado del Huila¹⁷.

Ecuador

Los glaciares de este país están ubicados más cerca del ecuador que cualquier otro glaciar Andino. Se encuentran confinados a las cumbres más altas de dos cadenas montañosas: la Cordillera Occidental, que cuenta con 4 glaciares y la Cordillera Oriental que contiene 3. Los glaciares son más comunes en la Cordillera Oriental porque el aire húmedo del Amazonas aumenta la precipitación en esta región¹⁸. Los glaciares situados en los volcanes Antizana y Cotopaxi son de particular interés porque contribuyen al suministro de agua de la capital de Ecuador, Quito, donde viven más de 2 millones de personas^{14, 19, 20}.

Perú

Perú concentra la mayor parte de los glaciares tropicales del mundo²¹ con una altitud mínima promedio de 4.800 m.s.n.m., y una máxima de 6768 m.s.n.m.

Las áreas englazadas se encuentran en 20 cadenas montañosas distintas, que se extienden desde el centro-norte del Perú hasta la frontera sur. Hay dos sistemas de glaciares principales: el más grande, Cordillera Blanca, parte de la Cordillera Occidental o rango occidental y se extiende por 200 km en la parte norte central del Perú. Ocho de los glaciares más grandes del Perú se encuentran en la Cordillera Blanca, que es la cordillera tropical más cubierta de glaciares del mundo²². Por otro lado, el Casquete glaciar Quelccaya, ubicado en la Cordillera Vilcanota, es el cuerpo de hielo más grande de este país.



Cráter del volcán Cotopaxi, uno de los más activos de Ecuador y ubicado a 50 km de Quito.





Glaciar en la Cordillera Vilcanota, Perú.



Bolivia

Los glaciares en Bolivia representan el 20% de los glaciares tropicales del mundo y se distribuyen a lo largo de dos cadenas montañosas principales, la Cordillera Occidental (oeste) y la Cordillera Oriental (este). Ésta última a su vez se divide en cuatro cadenas montañosas más pequeñas; Apolobamba, Real, Tres Cruces y Nevado Santa Vera Cruz. Las Cordilleras orientales albergan la mayoría de los glaciares que consisten en casquetes de hielo, glaciares de valle y montaña. La Cordillera Occidental sólo preserva algunos pocos y pequeños glaciares: el Sajama y otros limitados a volcanes cercanos. Debido a la precipitación limitada, hoy ya no existen glaciares en el sur de Bolivia²³.

Los Andes Tropicales albergan más del 95% de los glaciares tropicales del mundo.



Huayna Potosi, una de las montañas glaciadas de Bolivia.

ANDES DEL SUR

Los Andes meridionales y australes (o Andes Extratropicales) recorren la frontera entre Chile y Argentina y concentran la mayor cantidad de cuerpos de hielo del continente.

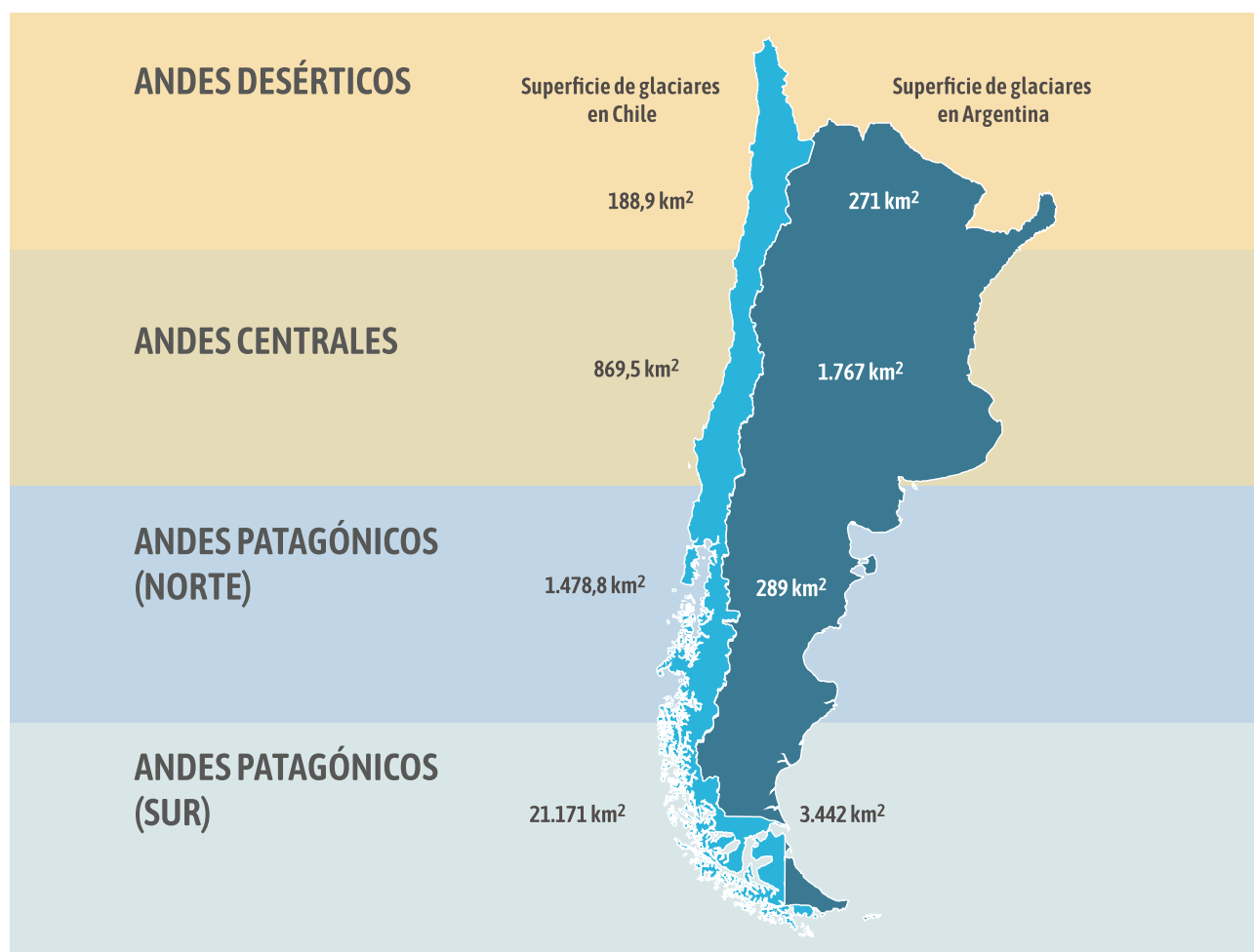
Chile

Los glaciares chilenos representan casi el 80% del área glaciaria de todo el sur de los Andes. Sus glaciares pueden encontrarse desde el volcán Tacora en el sur del Altiplano hasta la Isla Hoste en el Cabo de Hornos. El primer inventario completo y satelital de los Glaciares de Chile ²⁴ identificó 24.005 cuerpos de hielo mayores de 0,01 km², cubriendo un área de 23 708 ± 1185 km². Esto corresponde a cerca del 3,1% del territorio chileno.

Argentina

Argentina cuenta con 8.484 km² cubiertos de hielo en su territorio, de los cuales 5.769 se encuentran en la Cordillera de los Andes y 2.715 en las Islas del Atlántico Sur ²⁵.

En los Andes Desérticos, en el noroeste argentino, los glaciares son escasos pero abarcan una amplia distribución que incluye la Puna y la Cordillera Oriental. En el resto de las regiones inventariadas, los glaciares se encuentran concentrados sobre todo en las porciones occidentales y más elevadas de las cuencas hídricas, siguiendo los principales cordones de la Cordillera ²⁵.



La superficie cubierta por glaciares en los Andes de Argentina y Chile, por región climática. Los datos fueron obtenidos de los inventarios de Chile y Argentina ^{24,25}.



Glaciar Río Blanco (izquierda), glaciar de los Tres (derecha) y el Monte Fitz Roy en la Patagonia Argentina.





Glaciar Balmaceda, en la Patagonia Chilena.

Campos de Hielo Patagónicos

El Campo de Hielo Patagónico Norte (CHPN) ubicado completamente en Chile, y el Campo de Hielo Patagónico Sur (CHPS) compartido entre Chile y Argentina, representan la mayor masa de hielo presente en el planeta fuera de los casquetes polares de la Antártida y del Ártico²⁶. Estos campos de hielo patagónico son solo el remanente de un cuerpo de hielo mucho más grande que alcanzó su tamaño máximo hace unos 18.000 años.

En la actualidad, cubren una superficie de 4.200 y 13.000 km² respectivamente, descargando agua y hielo sobre el océano del lado oeste y sobre los lagos del lado este^{26,27}. De estos Campos de Hielo se desprenden un total de 49 glaciares de “desbordamiento”: entre los más conocidos se encuentran los glaciares Viedma (978 km²), Upsala (902 km²) y Perito Moreno (258 km²) en Argentina, y Pío XI (el mayor de todo el hemisferio sur, con 1.265 km²), Balmaceda, Serrano, y el Grey en Chile.



Vista aérea del glaciar Leones y el lago Leones en el Campo de Hielo Patagónico Norte, Chile.

Los Andes patagónicos concentran la mayor cantidad de hielo de todo el continente y el tercer cuerpo de hielo más grande del mundo: Los Campos de Hielo Patagónicos.

LOS IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CRIÓSFERA ANDINA



Desprendimiento del glaciar Perito Moreno, Argentina.

04.

CAMBIO CLIMÁTICO

La aceleración del cambio climático en las últimas décadas supera en extensión y velocidad cualquier variación de temperatura de los últimos dos milenios.

La evidencia científica de la influencia humana en el clima es contundente y muchos de los cambios observados desde la década de 1950 están ocurriendo a una velocidad sin precedentes²⁸. El aumento observado en las temperaturas medias mundiales desde mediados del siglo XX se debe fundamentalmente al incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) de origen antropogénico. El calentamiento global inducido por el hombre ha alcanzado 1°C sobre el nivel preindustrial y este cambio ha ocasionado impactos en sistemas humanos y naturales en todo el mundo²⁹. Estos impactos del calentamiento global se hacen patentes en la evidencia de un aumento de las temperaturas medias mundiales del aire y los océanos, el derretimiento generalizado de la criósfera y el incremento del nivel del mar.

El último informe especial del IPCC sobre el Océano y la Criosfera en un Clima Cambiante (SROCC) indica que bajo todos los escenarios climáticos considerados para el siglo XXI se prevé que el aumento de la temperatura atmosférica en las regiones de alta montaña supere las tasas promedio de calentamiento global¹. Es altamente probable que los Andes experimenten años cada vez más calurosos y que este calentamiento continúe acelerando el retroceso de sus glaciares y superficies nevadas.

Este reporte también concluye que la vasta mayoría de los glaciares monitoreados en las regiones de alta montaña del mundo han retrocedido y perdido masa a velocidades crecientes durante las últimas décadas. Los Andes lideran esta pérdida.

LOS ANDES EN UN CLIMA CAMBIANTE

La temperatura media anual en la mayoría de los países de los Andes Tropicales (Venezuela, Colombia, Ecuador y Perú) aumentó aproximadamente 0,8°C en promedio durante el siglo XX³⁰. En las montañas andinas de Chile y Argentina, las temperaturas han aumentado entre 0,2°C y 0,3°C por década desde mediados de la década de 1970 y continúan en aumento^{31,32}.

La tasa de calentamiento atmosférico se ve amplificada con la elevación, de modo que los entornos de alta montaña experimentan cambios de temperatura mucho más rápidos que los entornos de menor elevación³³. Durante los últimos 50 años, las zonas más elevadas de los Andes tropicales han experimentado un calentamiento superficial de aproximadamente un 0,1 °C por década³².

En cuanto a la precipitación, las tendencias son difíciles de estimar en los Andes debido a la falta de registro y de observaciones confiables de largo plazo. Además, las precipitaciones anuales están sujetas a una alta variabilidad ya que dependen de la ubicación y están influenciadas por los eventos de El Niño.

Sin embargo, la tendencia general de las últimas dos décadas fue una disminución de la cubierta de nieve, en línea con el aumento de las temperaturas. La línea de nieve se está desplazando hacia arriba como consecuencia del aumento de la altitud del nivel de congelación (isoterma de 0°C). Esta tendencia ha sido especialmente significativa en los Andes centrales y en los flancos orientales³⁴.

PROYECCIONES CLIMÁTICAS PARA LOS ANDES

Las proyecciones indican que las temperaturas en los Andes tropicales podrían aumentar entre 2°C y 5°C para fines del siglo XXI mientras que en los Andes del sur se estima un aumento de entre 1°C y 7°C ^{28,35}.

La mayoría de los modelos climáticos predicen un aumento en las precipitaciones durante la estación húmeda y una disminución durante la estación seca en los Andes tropicales, así como en la región del Altiplano. Bajo el escenario de altas emisiones del IPCC (RCP 8.5), para el año 2100, se proyecta que las precipitaciones aumentarán a lo largo de las regiones costeras de Colombia y Ecuador, en algunos lugares a lo largo de los Andes orientales y al sur del Ecuador. Sin embargo, se prevé que éstas disminuyan en la región sur de los Andes Tropicales, incluyendo las regiones del Altiplano, lo que llevaría a una mayor sequía. Respecto a los Andes del Sur (Chile y Argentina) se esperan importantes reducciones en las precipitaciones para el próximo siglo ²⁸.



Las fracturas del Glaciar Grey en Chile ponen en evidencia los impactos del cambio climático sobre los glaciares patagónicos.

IMPACTOS OBSERVADOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CRIÓSFERA ANDINA

En la cordillera de los Andes, el progresivo aumento de la temperatura y los cambios en el patrón de precipitaciones están llevando a una reducción en la acumulación de hielo y acelerando el derretimiento de glaciares y nieve de forma alarmante^{36,37}.

Entre 2000 y 2018, la pérdida total de hielo en los Andes fue de 22,9 gigatoneladas por año. Esto se traduce en que en todas las regiones, los glaciares perdieron en promedio el equivalente a unos 0,70 metros de agua al año, es decir más de 12,5 metros de agua equivalente en 18 años³⁷.

Los glaciares del sur de la Patagonia y de los Andes Tropicales son los que más han retrocedido en esta cordillera en comparación con las pérdidas relativamente moderadas en los Andes Secos. Esta pérdida de masa se mantuvo a una tasa elevada y constante en los últimos 20 años³⁷.

En los Andes del Sur, el promedio de pérdida de masa glaciar fue la más alta del mundo durante las últimas tres décadas, superando a la de cualquier otra región montañosa del planeta^{1,37}.

Los glaciares de los Andes tropicales son particularmente sensibles al cambio climático porque mantienen una temperatura cercana al punto de fusión durante todo el año. En especial, aquellos glaciares más pequeños que se encuentran a bajas altitudes³⁸. Leves cambios en la temperatura tienen importantes consecuencias sobre la masa glaciar en estas regiones.

Los glaciares andinos se encuentran entre los que se están reduciendo más rápidamente y los que más contribuyen al aumento del nivel del mar en todo el planeta. El retroceso de glaciares a causa del cambio climático está siendo evidenciado en todos los países Andinos:

Venezuela ha perdido todos menos uno de sus glaciares: el glaciar Humboldt. Sin embargo se prevé que para 2021, este único glaciar haya desaparecido también¹⁶.

En Colombia, se ha producido una rápida retirada a lo largo del siglo y esta se ha acelerado en las últimas décadas. Ocho de los glaciares tropicales de Colombia desaparecieron durante el siglo XX³⁹ y la tendencia continúa en el siglo XXI⁴⁰. Se predice que solo los glaciares más grandes ubicados en los picos más altos persistirán hasta la segunda mitad de este siglo.

Los glaciares de Ecuador han sufrido un retroceso dramático en los últimos 50 a 60 años y se espera que esta situación siga de la misma forma a lo largo del siglo. La pérdida de masa de los glaciares de la región cercana a Quito ha sido sustancial en las últimas décadas y se espera que continúe bajo los distintos escenarios de cambio climático^{15,41}. Por ejemplo, el volcán Cotopaxi ha perdido aproximadamente el 52% de su cobertura de hielo entre 1976 y 2016^{18,42,43}.

En los últimos 50 años, los glaciares peruanos perdieron entre el 40 y el 98% de su superficie. Este país alberga la mayor cantidad de glaciares tropicales del mundo. Los glaciares de todas las Cordilleras se han retirado a pasos agigantados, siendo la más afectada la Cordillera Chila⁴⁴. La Cordillera de Vilcanota, perdió la mitad de su área de glaciares entre finales de los años 70 y principios de los años 2010⁴⁵⁻⁴⁷. Se estima que el glaciar Quelccaya, fuente de recursos hídricos de Lima, perdió el 42% de su área entre 1975 y 2011, y que este retroceso se aceleró notablemente durante la década de los 1990s y 2000⁴⁸.

En Bolivia, desde la década de 1960 los glaciares de la Cordillera Real han perdido alrededor de la mitad de su masa⁴⁹. Muchos de estos glaciares, con un área de menos de 0,5 km², son tan pequeños que son aún más vulnerables a seguir retrocediendo. El glaciar Chacaltaya, ubicado en la Cordillera Real, solía servir como una pequeña estación de esquí para la población urbana de La Paz. Para 2009, el glaciar había desaparecido por completo.

El glaciar Pastoruri, en la Cordillera Blanca de Perú, ha perdido una gran parte de su masa a causa del cambio climático.

En todos los países andinos los glaciares están retrocediendo y en los Andes del sur la velocidad de retroceso fue más alta que cualquier región montañosa del mundo. Los más afectados son aquellos de menor altitud en los Andes Tropicales.

En los Andes de Chile y Argentina, la mayor parte de los glaciares también están retrocediendo a una velocidad que ha ido aumentando en las últimas décadas ^{37,50,51}. Como consecuencia, los lagos glaciares de toda esta región han aumentado en número (43%) y extensión de área (7%) entre 1986 y 2016 ⁵². Los grandes glaciares del sur de la Patagonia han experimentado el retroceso más vertiginoso. Esta sub-región contiene los Campos de Hielo Patagónicos y se caracteriza por tener grandes glaciares de desprendimiento. Durante las dos últimas décadas, los Andes patagónicos del Sur exhibieron la tasa de balance de masa más negativa de todas las regiones montañosas del mundo ^{1,37}. La tasa de deshielo y la contribución al nivel del mar de los Campos de Hielo Patagónicos aumentaron notablemente en el siglo XX ^{37,53,54}. Algunas estimaciones indican que el derretimiento de estos campos de hielo representan casi el 10% del aumento total del nivel del mar causado en todo el planeta por los glaciares de montaña en los últimos 50 años ^{37,54}. Los glaciares del norte de la Patagonia y de Tierra del Fuego también presentan balances de masa negativos. Entre 2000 y 2009, los glaciares de los Andes desérticos, Centrales y del norte de la Patagonia se mantuvieron relativamente estables al contrario de lo que ocurría en otras zonas de la cordillera. Sin embargo, a partir de 2009 esta tendencia cambió y comenzaron a retroceder de forma acelerada ³⁷. Algunos glaciares que se encuentran a mayor altitud también están retrocediendo, aunque de forma más lenta, y muy pocos siguen avanzando debido a la dinámica climática local.

¿QUÉ SUCEDERÁ CON LOS GLACIARES ANDINOS EN EL FUTURO?

El progresivo aumento de la temperatura y cambios en el régimen de precipitaciones asociado al cambio climático antropogénico está teniendo un efecto directo en el comportamiento y balance de los glaciares, acelerando su derretimiento. Los glaciares son sistemas altamente complejos con interacciones no-lineales entre los componentes que definen sus regímenes y equilibrios. Por tanto, el comportamiento de cada glaciar está definido por las condiciones locales particulares.

El primer informe global sobre glaciares de la Unión Internacional de Conservación de la Naturaleza (IUCN, por sus siglas en inglés) inventarió 19.000 glaciares de sitios Patrimonio de la Humanidad y proyecta que cerca del 50% de estos lugares podrían desaparecer por completo de aquí a 2100 si las emisiones de GEI continúan como ahora ⁵⁵. Estos enclaves incluyen el Parque Nacional Los Glaciares en Argentina, que contiene algunos de los glaciares más grandes de la Tierra: para este sitio, se prevé una pérdida de hielo de alrededor del 60% del volumen actual para el año 2100 ⁵⁵.

El SROCC del IPCC concluye que los glaciares de todas las regiones montañosas del mundo seguirán perdiendo masa a lo largo del siglo, pero subraya que las reducciones de masa (promedio) proyectadas para el período entre 2015 y 2100 oscilan entre el 18% para escenarios de bajas emisiones y el 36% para escenarios de altas emisiones ¹.

En regiones de bajas latitudes este efecto será aún más drástico: en los Andes Tropicales, los modelos glaciológicos ejecutados bajo todos los escenarios de emisión sugieren que en el futuro los glaciares disminuirán dramáticamente su volumen. La magnitud de esta disminución depende del escenario de emisiones utilizado: bajo el escenario de calentamiento climático moderado se pronostican pérdidas de volumen del 78-97%, mientras que para un escenario de emisiones altas las pérdidas aumentan al 93-100% ⁵⁶.

Todas las proyecciones climáticas indican que los glaciares andinos continuarán retrocediendo a lo largo del siglo. La magnitud y, por ende, el impacto de este deshielo depende de qué tanto logren reducirse las emisiones de GEI en las próximas décadas.

CADA GRADO IMPORTA: LA IMPORTANCIA DE REDUCIR LAS EMISIONES A NIVEL GLOBAL

A pesar de que aún bajo los escenarios más optimistas se espera que muchos glaciares desaparezcan y que otros retrocedan sustancialmente, la magnitud de este derretimiento varía según los distintos escenarios de emisiones.

Nuevos estudios demuestran que la diferencias en el retroceso de glaciares durante el siglo XXI entre los escenarios de bajas y altas emisiones de GEI y sus impactos asociados son considerables⁵⁷⁻⁶¹. Si bien la reducción de las emisiones tendría un efecto algo limitado sobre el deshielo de los glaciares durante el siglo XXI, evitar la desaparición total de estos cuerpos de hielo supone un enorme beneficio para las generaciones futuras⁶¹.

Entre el presente y fines del siglo, el derretimiento de los glaciares bajo el escenario de 1,5°C aportaría 7,6 cm al nivel del mar. Esto aumenta a 8,9 cm bajo un escenario de 2°C de aumento de temperatura y hasta 14,2 cm para un escenario de altas emisiones (RCP8.5)⁶¹.

En los Andes Peruanos, un escenario de bajas emisiones podrían salvaguardar el 40% de las áreas de glaciares actuales. Mientras tanto, una trayectoria de altas emisiones darían como resultado la desaparición casi por completo de sus glaciares tropicales para fines de este siglo, algo que tendría consecuencias dramáticas^{60,62}.

Esos hallazgos subrayan la tremenda importancia de fortalecer los compromisos climáticos a nivel mundial, aumentando la ambición e implementando fuertes políticas de reducción de emisiones de GEI.

Aumentar la ambición de los compromisos de mitigación a nivel mundial es crucial para salvaguardar el futuro de nuestros glaciares y evitar una desglaciación irreversible a gran escala.

OTRAS AMENAZAS: LA MINERÍA

La actividad minera en la región Andina ha sido altamente destructiva de los ecosistemas de montaña, incluidos los páramos, los salares, las vegas y bofedales de altura y los glaciares⁶³. Empresas mineras nacionales y trasnacionales han contribuido con la destrucción directa de muchos glaciares en muchos países de la región y particularmente en Chile. Algunas de las operaciones nocivas de esta actividad sobre los glaciares son la construcción de caminos en la etapa de exploración, en la que se los cubre de arena, sal y rocas. También el uso de explosivo para la construcción de caminos y plataformas de sondaje, el derrame de aceite, petróleo y tóxicos sobre los glaciares, la remoción masiva de hielo con maquinaria pesada y la sepultación de glaciares bajo botaderos de estériles, que acelera su velocidad de deslizamiento debido al mayor peso.

Hasta hoy, la industria minera ha cubierto, removido y perturbado millones de metros cúbicos de hielo glacial en las cuencas del Mapocho y el Aconcagua en los Andes Chilenos⁶⁴. Algunos gobiernos nacionales y subnacionales tienen un fuerte interés en mantener y promover la minería bajo cualquier costo ambiental ya que esta actividad representa un importante sector de su economía.

El uso del agua en la industria minera tampoco es menor, ya que numerosas concesiones y operaciones mineras se ubican en zonas de escasez hídrica como es el caso del desierto de Atacama, en el extremo norte de Chile. Asimismo, las reacciones químicas del material de descarte de la actividad minera muchas veces conducen a la contaminación y acidificación de las aguas.

En un contexto de cambio climático y creciente estrés hídrico en muchas regiones de los Andes, el desarrollo de la actividad minera resulta incompatible con la preservación de los glaciares y por ende con la garantía de acceso al agua potable como derecho humano fundamental.

CONSECUENCIAS



Mujer peruana sembrando un campo cerca de Maras, en el Valle Sagrado, Perú. Los agricultores locales, continúan desarrollando actividades agrícolas en el área que rodea el sitio utilizando técnicas tradicionales.

05.

El deterioro de los glaciares tiene y tendrá efectos sistémicos y sinérgicos sin precedentes. Su retroceso ya está provocando cambios en su contribución a la escorrentía en las cuencas de montañas en todo el mundo ⁶⁵.

Se prevé que los cambios en la línea de nieve y la retirada de los glaciares debido al calentamiento en las altas montañas continúen causando peligros y riesgos naturales para la biodiversidad, los ecosistemas terrestres y de agua dulce, la agricultura, la energía hidroeléctrica, las actividades recreativas y la infraestructura si no se toman medidas de adaptación adecuadas. A su vez, este derretimiento disminuye el efecto de albedo global y potencia el calentamiento en un proceso de retroalimentación positiva.

Estos cambios plantearán grandes desafíos para los medios de vida y otras actividades económicas dentro y fuera de las regiones montañosas de los países Andinos.

Es importante remarcar que las consecuencias de la desaparición de los glaciares son especialmente graves cuando las personas tienen una capacidad limitada para adaptarse a los cambios en la disponibilidad de agua debido a la falta de recursos financieros y conocimiento o cuando la demanda por el agua se intensifica cada vez más ⁶⁶.



Peligros e impactos observados en los ecosistemas y sistemas humanos durante las últimas décadas que pueden atribuirse, al menos en parte, a los cambios en la criósfera de la región Andina. Adaptado de: IPCC, 2019¹.

SUMINISTRO DE AGUA DULCE

El deshielo acelerado de los glaciares conduce a cambios importantes en la hidrología estacional, afectando su contribución relativa a la disponibilidad y suministro de agua y el momento de máxima descarga⁶⁷.

A pesar de que en el corto plazo, el derretimiento de los glaciares causa un aumento en la disponibilidad del agua almacenada, su desaparición causará cambios muy abruptos en los caudales estacionales debido a la falta de un “amortiguador” durante la estación seca^{67,68}. La escorrentía pasará gradualmente de suministrar agua en forma continua a una situación en la que su mayor aporte se concentrará en la estación lluviosa mientras que en la estación seca el caudal base será muy escaso o nulo⁶⁹. Esto tiene graves consecuencias sobre la disponibilidad de agua para consumo humano, la agricultura y la generación de energía hidroeléctrica.

Muchas de las zonas rurales de las tierras altas andinas son particularmente vulnerables a la escasez de agua, especialmente en las regiones áridas y semiáridas. Se espera que los cambios en la escorrentía fluvial sean mayores en regiones donde los ríos atraviesan zonas estacionalmente áridas como Perú⁷⁰. El estrés hídrico de estas regiones se exacerba aún más por el hecho de que son comunidades típicamente rurales en riesgo de pobreza y con capacidad de adaptación limitada⁷¹⁻⁷⁴.

La reducción en el almacenamiento y provisión de agua en los glaciares debido al cambio climático ha afectado significativamente los regímenes hidrológicos de los Andes y continuará haciéndolo.

En los Andes áridos de Chile y Argentina (ríos San Juan, Mendoza, Aconcagua y Maipo), la descarga fluvial disminuyó notablemente después de 2009, con reducciones que oscilaron entre el 28 y el 46%³⁷. Esta preocupante reducción de la escorrentía fluvial en estas cuencas semiáridas pobladas coincide con un aumento sustancial de la pérdida de masa de los glaciares después de 2009. Estos cambios reflejan las condiciones muy secas experimentadas en esta región desde 2010, que han sido denominadas colectivamente como la “Megasequía” y que aún no ha terminado. La contribución de los glaciares en estas cuencas desde el 2009 ayudó a mitigar la magnitud y efectos de este período seco generalizado al aportar entre el 3 y el 8% de la descarga total registrada en estos ríos³⁷. Esto demuestra la importancia de los glaciares como reservas y amortiguadores hídricos en estas regiones semiáridas.

El retroceso de los glaciares también puede afectar directamente la calidad del agua. En los Andes tropicales este retroceso ha deteriorado fuertemente la calidad del agua en áreas como la Cordillera Blanca, Perú, debido a las altas concentraciones de plomo y níquel que quedan expuestos y que luego son arrastrados por la corriente⁷⁵.

AUMENTO DEL NIVEL DEL MAR

El derretimiento de las capas de hielo en Groenlandia y la Antártida, así como el derretimiento de los glaciares de todo el mundo, está provocando el aumento del nivel del mar (ANM)^{76,77}. Asimismo, la pérdida de hielo de estos sistemas puede además afectar la circulación oceánica global⁷⁸ y los ecosistemas marinos⁷⁹.

La pérdida de masa global de hielo glaciar ha aumentado significativamente en las últimas décadas. Entre 1961 a 2016 los glaciares del mundo perdieron más de 9 billones de toneladas de hielo, contribuyendo al ANM en 27mm. Actualmente se estima en 335.000 millones de toneladas el hielo perdido cada año, lo que equivale a una tasa de casi

1 mm/año de ANM⁸⁰. Esta tasa actual de pérdida de masa representa entre el 25 y el 30% del aumento observado. Esta proporción equivale a la contribución del derretimiento de la capa de hielo de Groenlandia y es superior a la de la Antártida.

Excluyendo a los casquetes polares y Groenlandia, la mayor contribución a este aumento en el nivel del mar proviene de los glaciares de Alaska, seguidos por los de la Patagonia⁸⁰.

CONTRIBUCIÓN ANDINA AL AUMENTO EN EL NIVEL DEL MAR

El derretimiento de las masas de hielo de los Andes aporta el 10% de la contribución mundial total de los glaciares de montaña al aumento del nivel del mar³⁷. Este valor representa el doble de lo que contribuyen todos los glaciares de las altas montañas de Asia, pese a que estos últimos cubren un área tres veces mayor.

En particular, el deshielo de los Campos de Hielo Patagónicos ha contribuido en gran medida al ANM por

unidad de superficie. Los glaciares de esta región cubren un área cinco veces más pequeñas que sus contrapartes de Alaska (90.000 km²), sin embargo, son responsables de 9% de la contribución proveniente únicamente de glaciares de montaña contra el 30% en Alaska^{81,82}.

La contribución de la Patagonia al ANM es, por lo tanto, desproporcionadamente mayor de lo que se esperaría dada su superficie.

El derretimiento de los glaciares patagónicos contribuye significativamente al aumento del nivel del mar. Ésta pérdida de agua dulce hacia los océanos es irreversible.

PÉRDIDA DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS Y BIODIVERSIDAD

Aunque nuestra comprensión sobre los procesos involucrados en el retroceso de los glaciares ha mejorado mucho en los últimos años, las consecuencias de este fenómeno para los ecosistemas naturales andinos son aún poco conocidas. Existe evidencia de que el retroceso de los glaciares conlleva a la pérdida de biodiversidad e incluso a la extinción de algunas especies endémicas a estas cuencas⁸³.

Los ecosistemas andinos como los páramos de los Andes Tropicales del norte podrían verse gravemente afectados por las consecuencias del retroceso de los glaciares. Estos ecosistemas contienen una flora endémica única y proporcionan recursos y servicios ecosistémicos para las poblaciones cercanas⁸⁴. En Ecuador, la pérdida de la contribución del agua de deshielo a la descarga de los ríos no sólo afectará las cuencas con baja cobertura glaciar y la capacidad de regulación de los ríos (especialmente durante la estación seca), sino que también interrumpirá la capacidad de producción de agua de los páramos y acuíferos existentes, dado que éstos son alimentados en parte por el agua de deshielo glacial⁸⁵⁻⁸⁷.

Los humedales, en particular los bofedales junto a los márgenes de los ríos y manantiales en pajonales y desiertos en las zonas más altas de los Andes, son archipiélagos de diversidad en los que el deshielo puede provocar una menor disponibilidad de agua, aumentando la salinización y a su vez las emisiones de GEI⁸⁸.

Los páramos son uno de los ecosistemas más importantes de los Andes y podrían verse seriamente afectados por el retroceso de los glaciares.





INUNDACIONES, DESLIZAMIENTOS Y AVALANCHAS

La aceleración del deshielo de la nieve y los glaciares conduce a la formación de nuevos lagos glaciares que pueden amplificar los peligros naturales para las poblaciones que se encuentran río abajo.

En algunos casos, estos lagos contenidos por la presa de morrena, que es el depósito de material transportado por el glaciar pueden ser altamente inestables. Con el tiempo, podrían ocurrir fallas de la presa causando un “estallido súbito de lago glaciar” (o GLOF, por sus siglas en inglés). Los GLOFs puede desencadenar inundaciones y alterar el curso y la calidad del agua, representando una amenaza importante para las personas e infraestructura aguas abajo ⁸⁹.

Algunos ejemplos de estos sucesos en los Andes incluyen un GLOF en 1941 en el lago Palcacocha en Perú que causó la muerte de 5.000 personas. En 2010, partes de la ciudad peruana de Carhuaz fueron destruidas por un gran GLOF causado por el lago 513 ⁹⁰.

Otro peligro asociado relevante es la desestabilización de los taludes de montaña compuestos por suelos helados (permafrost), lo cual puede provocar deslizamientos y avalanchas de roca.

Desde la década de 1940, este tipo de eventos han matado a miles de personas ^{91,92} en la Cordillera Blanca de Perú y siguen siendo una amenaza ⁹³.

ACTIVIDADES ECONÓMICAS Y ENERGÍA

El retroceso de los glaciares Andinos tendrá impactos negativos sobre la economía de las comunidades de montaña que subsisten por su presencia como atractivos turísticos. Algunos paisajes glaciares están perdiendo su estética o atractivo, mientras que otros se enfrentan a la perspectiva de un declive sostenido o incluso de desaparición. El glaciar Pastoruri es uno de los glaciares más accesibles de los Andes peruanos y recibe a miles de turistas cada año. A fines de 2007, el acceso a la zona de uso turístico y recreativo del glaciar fue suspendido debido a “condiciones climáticas adversas”. Este glaciar ha perdido el 22% de su tamaño y el 15,5% de su masa de hielo en los últimos 30-35 años. Durante el período 1991-2006, el centro de esquí más alto de Bolivia, el área del glaciar Chacaltaya se redujo en un 80%. En 2009, el glaciar había desaparecido por completo y, como resultado, había perdido su función de circuito de esquí de verano ⁹⁴.

Los paisajes recientemente descubiertos por los glaciares en retroceso contienen gran cantidad de material suelto, lo que aumenta el sedimento en el agua que influye sobre su potabilidad. El aumento de sedimento en el agua también constituye un problema para las centrales hidroeléctricas, debido a que las turbinas sufren un mayor desgaste por erosión.

En la mayoría de los países andinos, la energía hidroeléctrica es la principal fuente de energía para la generación de electricidad. Como estos recursos hídricos se ven afectados por la reducción de la escorrentía estacional, es posible que estos países tengan que cambiar a otras fuentes de energía, lo que se traduce en grandes desembolsos de capital, mayores costos operativos y de mantenimiento y, más probablemente una mayor dependencia de combustibles fósiles e instalación de plantas hidroeléctricas en la cuenca amazónica. Ambas alternativas tienen enormes impactos ambientales y ecológicos.

Nevados de Payachatas, situados en la frontera de Bolivia y Chile. La cubierta permanente de nieve y hielo sobre estos volcanes advierte sobre la potencial generación de lahares.

Chacaltaya solía ser el centro de esquí más alto del mundo y el único en Bolivia.



POLÍTICAS Y PROTECCIÓN: ¿SON SUFICIENTES?

06.

Existe una clara necesidad de fortalecer las políticas de protección de los glaciares como reservas estratégicas de agua dulce en los países Andinos para poder abordar la escasez de este recurso en el contexto del cambio climático.

Con la excepción de Argentina, no existe en ningún país andino un marco normativo particular o especial para la protección de glaciares. La adopción y consideración de leyes nacionales para regular y proteger glaciares montañosos es reciente y este tema solo ha comenzado a emerger en las agendas políticas en las últimas dos décadas. La vinculación entre áreas protegidas y glaciares es tal vez el único ámbito en que estos bienes tienen protección en algunos países andinos.

A pesar de que Chile concentra la mayor superficie de glaciares del continente en su territorio nacional, no existe en este país ninguna norma para su protección. Un primer borrador de proyecto de Ley fue propuesto en 2006 y al menos tres revisiones fueron presentadas desde entonces ⁹⁵. Sin embargo, estas iniciativas no prosperaron ya que el sector extractivista ejerce un fuerte lobby sobre las autoridades para frenar este tipo de legislaciones que buscan prohibir las actividades mineras en ambientes glaciares y periglacial.

En 2019, la Comisión de Medio Ambiente y Bienes Nacionales del Senado aprobó, por unanimidad, la idea de legislar el Proyecto de ley de Protección de Glaciares con el fin de preservarlos como reservas estratégicas de agua dulce y como fuente de información científica y el turismo sustentable.

LA LEY DE GLACIARES DE ARGENTINA

Argentina fue el primer país del mundo en adoptar una ley oficial de protección de glaciares en todo su territorio. Sin embargo, su promulgación recorrió un camino sinuoso: En 2008 esta ley fue aprobada por las dos cámaras del Congreso Nacional, solo para ser vetada por la entonces presidente de la Nación Cristina Fernández de Kirchner, quien argumentó que esta norma tendría efectos adversos sobre la economía del país, al obstruir la actividad minera ⁹⁶.

Sin embargo este veto popularizó el debate que hasta ese momento había ocurrido entre especialistas y afiliados directos desencadenando una campaña de difusión y socialización que instaló en la discusión pública el conflicto de intereses entre las empresas mineras (con sus aliados políticos) y los derechos colectivos (ambientales). Finalmente el parlamento aprobó la Ley de protección de Glaciares el 30 de septiembre de 2010.

Obstáculos para su efectiva implementación

A pesar de que la aprobación de la Ley de Glaciares implicó un gran paso en términos de protección ambiental, su implementación ha enfrentado y aún enfrenta serias dificultades y presiones del lobby minero ⁹⁷:

- La designación de presupuesto para la implementación de esta Ley fue identificada por primera vez en el año 2018, a 8 años de su sanción.
- Al poco tiempo de la sanción, la Justicia Federal de la provincia de San Juan hizo lugar a las cautelares solicitadas por las empresas Barrick Gold y la Asociación Obrera Minera Argentina (AOMA) y la debida implementación de Ley de Glaciares se vio impedida en San Juan, hasta el año 2012.

El imponente glaciar Perito Moreno, se origina en el Campo de Hielo Patagónico Sur desembocando en el lago Argentino.



- En 2014, la Corte Suprema dejó sin efectividad una acción iniciada por la Cámara Minera de la provincia de Jujuy que solicitaba la inconstitucionalidad de la Ley y revocó otra cautelar dictada por el Juzgado Federal de esa provincia que había suspendido la vigencia de la norma.
- En 2017, el poder Ejecutivo intentó reformar el decreto reglamentario de La ley de Glaciares, con la intención de flexibilizar el criterio usado para delimitar las zonas vedadas para actividades como la minería.
- En 2019, la Corte Suprema de Justicia de la Nación ratificó la constitucionalidad de esta ley rechazando un reclamo de la empresa minera canadiense Barrick Gold y la provincia de San Juan.

Importancia del inventario

La creación del Inventario Nacional de Glaciares (ordenado en el Artículo 3 de la ley) estuvo a cargo del Ministerio de Ambiente y el Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA). Este proceso se vio inmerso en una fuerte controversia ya que el instituto estableció, con argumentos metodológicos, que sólo fueran inventariados todos los cuerpos de hielo que tuviesen superficies mayores a 0,01 km². Al emplear criterios de identificación que no se correspondían con los establecidos en la norma (que protege todos los cuerpos de hielo “cualquiera sea su forma, dimensión y estado de conservación”), se consideró que esta metodología violaba la ley y la causa fue elevada a juicio. Asimismo, se planteó que sus dilaciones permitieron la continuidad de las actividades mineras y contaminación en áreas que deberían haber estado protegidas ⁹⁷.

Ley de Glaciares y Cambio Climático

En su artículo 10 inciso b, esta ley requiere la formulación de políticas climáticas que garanticen la preservación de los glaciares y del ambiente periglacial, tanto en la órbita nacional, como en el marco de los acuerdos internacionales sobre cambio climático. En virtud de ello, el Estado argentino debería adoptar las medidas de mitigación del cambio climático en el plano nacional e internacional que contribuyan con este objetivo.



Artículos de la Ley Nº 26.639 sobre Régimen de Presupuestos Mínimos para la Preservación de los Glaciares y del Ambiente Periglacial (Argentina):

1. Objetivos: establecimiento de presupuestos mínimos para proteger los glaciares y el ambiente periglacial como reservorios de agua.
2. Definición de glaciar y de ambiente periglacial.
3. Creación de un Inventario Nacional de Glaciares (ING).
4. Información incluida en el ING.
5. Institución responsable de la realización del Inventario.
6. Actividades prohibidas.
7. Descripción de las actividades que requieren Evaluación de Impacto Ambiental.
8. Autoridades competentes: Administración de Parques Nacionales (APN).
9. Autoridad nacional encargada de aplicar la ley.
10. Funciones de la autoridad nacional de aplicación.
11. Infracciones y sanciones.
12. Sanciones por reincidencia.
13. Responsabilidades del infractor
14. Destino de las recaudaciones mediante multas.
15. Plazos para desarrollar el inventario.
16. Sector Antártico: aplicación de la ley bajo el Tratado Antártico.
17. Plazos para la aplicación de la ley.
18. Comunicación de la ley al Poder Ejecutivo.

EL CAMINO POR RECORRER: DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES



"Hielo y piedra" por mause_1960, usada bajo CC BY 2.0

07.

Sin lugar a dudas, la desaparición paulatina de muchos glaciares andinos a causa del cambio climático puede tornarse irreversible si no se toman medidas urgentes de mitigación.

Muchos glaciares continuarán retrocediendo a lo largo del siglo y por lo tanto, las comunidades andinas deberán afrontar los desafíos que esto promete, como la escasez de agua, los riesgos de inundación y la pérdida de servicios ecosistémicos.

Las proyecciones de retroceso de los glaciares, la disminución de la precipitación y el crecimiento demográfico continuo incrementan la presión sobre los sistemas hidrológicos locales y estos deberán atenderse apropiadamente. Será esencial maximizar otras oportunidades de almacenamiento de recursos hídricos y evitar que el agua almacenada en los glaciares durante todos estos siglos acabe escurriéndose hacia el mar y elevando el nivel de los océanos.

Para ello, es necesario construir decisiones de manera colectiva a través de la articulación de un gran número de actores a nivel nacional e internacional para lograr una implementación de políticas consensuadas, efectivas y de no arrepentimiento.

SUBIR LA APUESTA: AUMENTAR LA AMBICIÓN CLIMÁTICA

Es fundamental adoptar medidas urgentes a nivel mundial para reducir el calentamiento del planeta. Disminuir el deterioro de la criosfera depende principalmente de las medidas para reducir las emisiones de GEI, que requerirá una fuerte descarbonización del sistema energético, económico y de todos los sectores de la sociedad.

El Acuerdo de París tiene como objetivo evitar que el incremento de la temperatura media global del planeta supere los 2°C respecto a los niveles preindustriales y busca, además, promover esfuerzos adicionales que hagan posible que el calentamiento global no supere los 1,5°C. Para alcanzar esta meta, el mundo deberá reducir sus emisiones de carbono en al menos un 49% respecto a los niveles de 2017 para el año 2030 y luego lograr la neutralidad de carbono para el año 2050²⁹.

Actualmente, los esfuerzos realizados están lejos de ser suficientes para alcanzar este objetivo.

Es necesario que los países reflejen un mayor compromiso climático en sus Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDCs, por sus siglas en inglés) y Estrategias a Largo Plazo para 2050 (LTS, por sus siglas en inglés) no sólo para salvaguardar la criósfera Andina, sino también para reducir los efectos negativos del cambio climático sobre los ecosistemas, la salud y el bienestar de las personas en todo el mundo facilitando a su vez el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas (ODS).

ADAPTARSE

Las medidas de adaptación apuntan a moderar el daño o aprovechar las oportunidades que resultan de los efectos cambio climático⁷³. En particular, existe una necesidad de implementar medidas de planificación y adaptación para reemplazar el efecto de regulación natural de la nieve y el hielo en aquellas zonas donde se proyecta una reducción sustancial de la cobertura glaciar¹⁴.

Algunas de estas medidas consisten en implementar distintas alternativas tecnológicas para la captación de agua, eficientizar su uso y suministro, y mejorar el almacenamiento natural de agua en los ecosistemas andinos (Adaptación Basada en Ecosistemas)^{22,98}.

ADAPTACIÓN BASADA EN ECOSISTEMAS (ABE)

La Adaptación basada en Ecosistemas busca integrar el uso de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos en una estrategia general para ayudar a las personas a adaptarse a los impactos del cambio climático ⁹⁹.

Los ecosistemas de páramos húmedos andinos, que se encuentran en las tierras altas del oeste de Venezuela, Colombia, Ecuador y el norte de Perú, han demostrado ser muy importantes para el almacenamiento hidrológico ⁸⁴. Por lo tanto, es importante encontrar formas de apoyar y mejorar la capacidad natural de almacenamiento y regulación hidrológica de los ecosistemas con medidas tales como la restauración ecológica. Los proyectos de restauración ecológica requieren conocimientos técnicos y ecológicos ¹⁰⁰ y sus implicancias deben ser cuidadosamente consideradas ¹⁰¹.

Al promover el manejo sostenible, la conservación y la restauración de ecosistemas, la AbE está alineada con el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB), la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CNULD), la Convención sobre los Humedales (Convención de Ramsar), la Declaración de las Naciones Unidas sobre los Derechos de los Pueblos Indígenas (DNU DPI) y el Foro de las Naciones Unidas sobre los Bosques (FNUB), lo que conlleva sinergias y complementariedades entre las actividades y estrategias de AbE y otras acciones tendientes al manejo, conservación y restauración de ecosistemas con diversos fines ¹⁰².

Como se mencionó anteriormente, los estallidos de lagos glaciares o “GLOFs” también representan un gran peligro para muchas comunidades andinas. La ingeniería puede reducir el riesgo de estos desbordes mediante la instalación de bombas para reducir los niveles de agua, así como otros medios de estabilización de las presas de morrena ⁹⁰. Además, es esencial establecer sistemas de monitoreo más amplios y efectivos de lagos glaciares para mejorar la gestión de las amenazas ²².

Es importante que antes de implementar este tipo de estrategias se realice un análisis cuidadoso de los factores socio-económicos a nivel local que subyacen a la vulnerabilidad al cambio climático. Un acercamiento integrador y cuidadoso disminuye el riesgo de “maladaptación”, es decir de implementar medidas que solucionen un problema en un dominio, pero que aumenten la vulnerabilidad o riesgo en otro. Resulta importante entonces, evitar tomar acciones que respondan a intereses económicos de corto plazo pero comprometan la resiliencia de los ecosistemas y reduzcan la capacidad adaptativa a largo plazo.

Si bien los recursos disponibles son escasos y todavía muchos países Andinos tienen un sinnúmero de acciones por emprender, es necesario invertir en adaptación cuanto antes, ya que de lo contrario los impactos del cambio climático constituirán una carga difícil de manejar para las agendas de desarrollo de la región ¹⁰³.

PROTEGER

Es urgente y necesario avanzar en la discusión sobre políticas públicas y regulaciones nacionales y regionales para proteger los glaciares y prevenir los impactos de la minería, represas y otras actividades económicas sobre estas reservas de agua dulce en los países Andinos.

La creación de normas de protección de glaciares de nada sirve si no está acompañada de compromisos, presupuesto y herramientas que garanticen su correcta implementación. Resulta fundamental entonces:

- Facilitar y acelerar la compleción de los inventarios de glaciares en todos los países de la región, incluyendo a todos los glaciares y ambiente periglacial, sin importar sus dimensiones.
- Auditar actividades y proyectos en ejecución que representen una amenaza para los glaciares y ambiente periglacial, de manera transparente y participativa, por instituciones ajenas a la promoción de actividades dañinas para la preservación de estos ambientes.
- Hacer efectivas las prohibiciones de proyectos o actividades que quieran instalarse en zonas de glaciares o ambientes periglaciares.
- Ordenar el cese o traslado de aquellos proyectos que ya se encuentran en ejecución en glaciares o ambiente periglacial, y realizar la debida limpieza y restauración.

También resulta imperioso resguardar el delicado balance de los ecosistemas andinos y su biodiversidad mediante la creación de áreas protegidas.

FORTALECER EL PAPEL DE LAS COMUNIDADES LOCALES

La participación de las comunidades locales, conjuntamente con las autoridades locales y regionales andinas es esencial en la identificación de las medidas de adaptación más adecuadas. No sólo utiliza la experiencia de las mismas comunidades en el proceso de implementación efectiva de estrategias, sino que también fortalece el sentido de propiedad de la tierra y la concientización sobre el valor de los ecosistemas y sus recursos²².

RECONOCER E INCORPORAR EL CONOCIMIENTO ANCESTRAL

El reconocimiento y la integración de los conocimientos indígenas y locales con los conocimientos científicos promueve la resiliencia y la adaptación frente a los efectos del cambio climático²⁸. Muchas de estas prácticas están relacionadas con la gestión del agua en la agricultura. Por ejemplo el uso de terrazas e hileras y técnicas de irrigación y almacenamiento de agua mediante la recarga de los acuíferos (qochas o “siembra del agua”).

FACILITAR Y FORTALECER EL PAPEL DE LA CIENCIA EN LA TOMA DE DECISIONES

Incorporar el conocimiento científico y promover el fortalecimiento técnico institucional es la piedra angular para la toma de decisiones robustas frente al cambio climático. La interacción entre la ciencia y la política es a menudo débil y se ve obstaculizada por la definición de metas y objetivos comunes. Se necesita de la mejor ciencia disponible para garantizar la efectividad y el impacto de la toma de decisiones.

Potenciales puntos de acción pueden ser la articulación de redes de expertos y el fortalecimiento de proyectos de investigación pertinentes en curso. También es necesario fortalecer las capacidades profesionales regionales y establecer vínculos con grupos de investigación internacionales. Por último, podría ser ventajoso promover una revista o plataforma científica regional sobre el tema, de libre acceso y en español para facilitar y concentrar el intercambio de conocimiento.

EDUCAR

Fomentar la concientización de la población sobre el impacto del cambio climático sobre los glaciares y los recursos hídricos es crucial. Se necesita apoyar la formación de una masa crítica de expertos en la región especializada en educación y cambio climático y generar alianzas para construir y difundir el conocimiento a favor de la gente.

COOPERAR

Los cambios en la criósfera están interconectados a lo largo una gran gama de contextos socio-ecológicos, marcos legales, gobiernos e instituciones¹. Para hacer frente a los impactos del deterioro de la criósfera será necesaria la cooperación regional e internacional para compartir experiencias y conocimientos, así como para monitorear riesgos y facilitar medidas de adaptación y mitigación.

Programas de financiamiento, capacitación, investigación, entrenamiento y transferencia tecnológica son solo algunos ejemplos de tipos de vínculos que pueden y se están estableciendo entre los países andinos y con el resto del mundo.

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) reconoce los potenciales beneficios de las sinergias regionales que promueven la cooperación en el desarrollo y la aplicación de medidas de adaptación. Entre ellas figuran el intercambio de conocimiento, la prevención de la duplicación, las economías de escala y el reparto de costos y minimización de conflictos²².

REFERENCIAS

1. IPCC, 2019. Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (SROCC). In press (2019).
2. Devenish, C. & Gianella, C. (Eds.) 20 years of Sustainable Mountain Development in the Andes - from Rio 1992 to 2012 and beyond. Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina - CONSESAN. 73 (2012).
3. IPCC, 2013. Annex III: Glossary [Planton, S. (ed.)]. In: 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 and P.M. Midgley (eds.)]. (Cambridge University Press, 2013).
4. Glossary of geology. (American Geosciences Inst, 2011).
5. Garreaud, R. D. et al. The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21, 6307–6327 (2017).
6. Mark, B. G. et al. Glacier loss and hydro-social risks in the Peruvian Andes. *Glob. Planet. Change* 159, 61–76 (2017).
7. Buytaert, W. et al. Glacial melt content of water use in the tropical Andes. *Environ. Res. Lett.* 12, 114014 (2017).
8. Soruco, A. et al. Contribution of glacier runoff to water resources of La Paz city, Bolivia (16° S). *Ann. Glaciol.* 56, 147–154 (2015).
9. Ayala, A. et al. Modelling the hydrological response of debris-free and debris-covered glaciers to present climatic conditions in the semiarid Andes of central Chile. *Hydrol. Process.* (2016). doi:10.1002/hyp.10971
10. Water in Crisis: Chapter 2. (Oxford University Press, 1993).
11. Drenkhan, F., Carey, M., Huggel, C., Seidel, J. & Oré, M. T. The changing water cycle: climatic and socioeconomic drivers of water-related changes in the Andes of Peru. *Wiley Interdiscip. Rev. Water* 2, 715–733 (2015).
12. Borsdorf, A. & Stadel, C. The Andes: A Geographical Portrait. (Springer International Publishing, 2015).
13. Mark, B. G., McKenzie, J. M. & Gómez, J. Hydrochemical evaluation of changing glacier meltwater contribution to stream discharge: Callejon de Huaylas, Peru / Evaluation hydrochimique de la contribution évolutive de la fonte glaciaire à l'écoulement fluvial: Callejon de Huaylas, Pérou. *Hydrol. Sci. J.* 50, null-987 (2005).
14. Vergara, W. et al. Economic Impacts of Rapid Glacier Retreat in the Andes. *Eos Trans. Am. Geophys. Union* 88, (2007).
15. Vuille, M. et al. Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Sci. Rev.* 89, 79–96 (2008).
16. Braun, C. & Bezada, M. The History and Disappearance of Glaciers in Venezuela. *J. Lat. Am. Geogr.* 12, 85–124 (2013).
17. Glaciares en Colombia -IDEAM. Available at: <http://sgi.ideam.gov.co/en/web/ecosistemas/glaciares-colombia>. (Accessed: 9th September 2019)
18. Cáceres, B. Actualización del inventario de tres casquetes glaciares del Ecuador. (Univesity of Nice, 2010).
19. Francou, B., Ramirez, E., Cáceres, B. & Mendoza, J. Glacier Evolution in the Tropical Andes during the Last Decades of the 20th Century: Chacaltaya, Bolivia, and Antizana, Ecuador. *AMBIO J. Hum. Environ.* 29, 416–422 (2000).
20. Francou, B., Ribstein, P., Wagnon, P., Ramirez, E. & Pouyaud, B. Glaciers of the Tropical Andes: Indicators of Global Climate Variability. in *Global Change and Mountain Regions* (eds. Huber, U. M., Bugmann, H. K. M. & Reasoner, M. A.) 23, 197–204 (Springer Netherlands, 2005).
21. Kaser, G. & Osmaston, H. Tropical glaciers. (Cambridge University Press, 2002).
22. Schoolmeester, T., Verbist, K. & Johansen, K. S. The Andean glacier and water atlas: the impact of glacier retreat on water resources. (2018).
23. Messerli, B., Grosjean, M. & Vuille, M. Water Availability, Protected Areas, and Natural Resources in the Andean Desert Altiplano. *Mt. Res. Dev.* 17, 229 (1997).
24. Barcaza, G. et al. Glacier inventory and recent glacier variations in the Andes of Chile, South America. *Ann. Glaciol.* 58, 166–180 (2017).
25. IANIGLA. Resumen ejecutivo de los resultados del Inventario Nacional de Glaciares (ING). (2018).
26. Warren, C. & Sugden, D. The Patagonian Icefields: A Glaciological Review. *Arct. Alp. Res.* 25, (1993).
27. Aniya, M. The Use of Satellite and Airborne Imagery to Inventory Outlet Glaciers of the Southern Patagonia Icefield, South America. 9 (1996).

28. IPCC, 2014. Working Group II contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (Cambridge University Press, 2014).
29. IPCC, 2018. Global warming of 1.5°C. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. In press (2018).
30. Marengo, J. et al. Climate Change: Evidence and Future Scenarios for the Andean Region. in *Climate Change and Biodiversity in the Tropical Andes* 110–127 (2011).
31. Falvey, M. & Garreaud, R. D. Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006). *J. Geophys. Res.* 114, D04102 (2009).
32. Vuille, M., Franquist, E., Garreaud, R., Lavado Casimiro, W. S. & Cáceres, B. Impact of the global warming hiatus on Andean temperature: Global Warming hiatus in the Andes. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 120, 3745–3757 (2015).
33. Mountain Research Initiative EDW Working Group. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nat. Clim. Change* 5, 424–430 (2015).
34. Saavedra, F. A., Kampf, S. K., Fassnacht, S. R. & Sibold, J. S. Changes in Andes snow cover from MODIS data, 2000–2016. *The Cryosphere* 12, 1027–1046 (2018).
35. Jiang, K., Masui, T., Morita, T. & Matsuoka, Y. Long-Term GHG Emission Scenarios for Asia-Pacific and the World. *Technol. Forecast. Soc. Change* 63, 207–229 (2000).
36. Marzeion, B., Jarosch, A. H. & Gregory, J. M. Feedbacks and mechanisms affecting the global sensitivity of glaciers to climate change. *The Cryosphere* 8, 59–71 (2014).
37. Dussailant, I. et al. Two decades of glacier mass loss along the Andes. *Nature Geoscience* (2019). doi:10.1038/s41561-019-0432-5
38. Rabatel, A. et al. Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere* 7, 81–102 (2013).
39. Ceballos, J. et al. Fast shrinkage of tropical glaciers in Colombia. *Ann. Glaciol.* 43, 194–201 (2006).
40. Poveda, G. & Pineda, K. Reassessment of Colombia's tropical glaciers retreat rates: are they bound to disappear during the 2010–2020 decade? *Adv. Geosci.* 22, 107–116 (2009).
41. Francou, B., Vuille, M., Favier, V. & Cáceres, B. New evidence for an ENSO impact on low-latitude glaciers: Antizana 15, Andes of Ecuador, 0°28' S. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 109, (2004).
42. Jordan, E., Ungerechts, L., Cáceres, B., Peñafiel, A. & Francou, B. Estimation by photogrammetry of the glacier recession on the Cotopaxi Volcano (Ecuador) between 1956 and 1997 / Estimation par photogrammétrie de la récession glaciaire sur le Volcan Cotopaxi (Equateur) entre 1956 et 1997. *Hydrol. Sci. J.-J. Sci. Hydrol. - Hydrol. SCI J* 50, 1–961 (2005).
43. Cáceres, B. Dramatical reduction of Cotopaxi Glaciers during the last volcano awakening 2015-2016. in (2015).
44. Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM). El inventario nacional de glaciares: las cordilleras glaciares del Perú. *Aut. Nac. Agua* (2018).
45. Zubietta, R. & Lagos, P. Cambios de la superficie glaciar en la cordillera Huaytapallana: Periodo 1976 - 2006. in *Cambio climático en la cuenca del Río Mantaro* 59–67 (Instituto Geofísico del Perú, 2010).
46. López-Moreno, J. I. et al. Recent glacier retreat and climate trends in Cordillera Huaytapallana, Peru. *Glob. Planet. Change* (2013). doi:10.1016/j.gloplacha.2013.10.010
47. Veettil, B. K. & Souza, S. F. de. Study of 40-year glacier retreat in the northern region of the Cordillera Vilcanota, Peru, using satellite images: preliminary results. *Remote Sens. Lett.* 8, 78–85 (2017).
48. Hanshaw, M. N. & Bookhagen, B. Glacial areas, lake areas, and snow lines from 1975 to 2012: status of the Cordillera Vilcanota, including the Quelccaya Ice Cap, northern central Andes, Peru. *The Cryosphere* 8, 359–376 (2014).
49. Soruco, A., Vincent, C., Francou, B. & Gonzalez, J. F. Glacier decline between 1963 and 2006 in the Cordillera Real, Bolivia. *Geophys. Res. Lett.* 36, 10.1029/2008GL036238. (2009).
50. Malmros, J. K., Mernild, S. H., Wilson, R., Yde, J. C. & Fensholt, R. Glacier area changes in the central Chilean and Argentinean Andes 1955–2013/14. *J. Glaciol.* 62, 391–401 (2016).
51. Zazulie, N., Briche, E., Raga, G. B. & Rusticucci, M. Spatio-temporal mapping of glacier fluctuations in the subtropical Central Andes: Case studies of Alto Del Plomo and Volcan Maipo. *Remote Sens. Appl. Soc. Environ.* 8, 140–147 (2017).
52. Wilson, R. et al. Glacial lakes of the Central and Patagonian Andes. *Glob. Planet. Change* 162, 275–291 (2018).
53. Sakakibara, D. & Sugiyama, S. Ice-front variations and speed changes of calving glaciers in the Southern Patagonia Icefield from 1984 to 2011. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 119, 2541–2554 (2014).

54. Glasser, N. F., Harrison, S., Jansson, K. N., Anderson, K. & Cowley, A. Global sea-level contribution from the Patagonian Icefields since the Little Ice Age maximum. *Nat. Geosci.* 4, 303–307 (2011).
55. Bosson, J. -B., Huss, M. & Osipova, E. Disappearing World Heritage Glaciers as a Keystone of Nature Conservation in a Changing Climate. *Earth's Future* 7, 469–479 (2019).
56. Radić, V. et al. Regional and global projections of twenty-first century glacier mass changes in response to climate scenarios from global climate models. *Clim. Dyn.* 42, 37–58 (2014).
57. Clarke, G. K. C., Jarosch, A. H., Anslow, F. S., Radić, V. & Menounos, B. Projected deglaciation of western Canada in the twenty-first century. *Nat. Geosci.* 8, 372–377 (2015).
58. Kraaijenbrink, P. D. A., Bierkens, M. F. P., Lutz, A. F. & Immerzeel, W. W. Impact of a global temperature rise of 1.5 degrees Celsius on Asia's glaciers. *Nature* 549, 257–260 (2017).
59. Salzmann, N. et al. Glacier changes and climate trends derived from multiple sources in the data scarce Cordillera Vilcanota region, Southern Peruvian Andes. *Cryosphere Discuss.* 6, 387–426 (2012).
60. Schauwecker, S. et al. The freezing level in the tropical Andes, Peru: An indicator for present and future glacier extents. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 122, 5172–5189 (2017).
61. Marzeion, B., Kaser, G., Maussion, F. & Champollion, N. Limited influence of climate change mitigation on short-term glacier mass loss. *Nat. Clim. Change* 8, 305–308 (2018).
62. Juen, I., Kaser, G. & Georges, C. Modelling observed and future runoff from a glacierized tropical catchment (Cordillera Blanca, Perú). *Glob. Planet. Change* 59, 37–48 (2007).
63. Chile Sustentable. Glaciares y Minería. (2013).
64. Brenning, A. & Azócar, G. F. Minería y glaciares rocosos: impactos ambientales, antecedentes políticos y legales, y perspectivas futuras. *Rev. Geogr. Norte Gd.* (2010). doi:10.4067/S0718-34022010000300008
65. Casassa, G., López, P., Pouyaud, B. & Escobar, F. Detection of changes in glacial run-off in alpine basins: examples from North America, the Alps, central Asia and the Andes. *Hydrol. Process.* 23, 31–41 (2009).
66. Lynch, B. D. Vulnerabilities, competition and rights in a context of climate change toward equitable water governance in Peru's Rio Santa Valley. *Glob. Environ. Change* 22, 364–373 (2012).
67. Vuille, M. Climate Change and Water Resources in the Tropical Andes, Inter-American Development Bank. (2013). doi:10.13140/2.1.3846.9124
68. Bradley, R. S. Climate change: Threats to Water Supplies in the Tropical Andes. *Science* 312, 1755–1756 (2006).
69. Viviroli, D. et al. Climate change and mountain water resources: overview and recommendations for research, management and policy. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15, 471–504 (2011).
70. Kaser, G., Grosshauser, M. & Marzeion, B. Contribution potential of glaciers to water availability in different climate regimes. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 107, 20223–20227 (2010).
71. Heikkinen, A. Climate Change in the Peruvian Andes: A Case Study on Small-Scale Farmers' Vulnerability in the Quillcay River Basin. *Iberoam. – Nord. J. Lat. Am. Caribb. Stud.* 46, 77–88 (2017).
72. Hunt, A. & Watkiss, P. Climate change impacts and adaptation in cities: a review of the literature. *Clim. Change* 104, 13–49 (2011).
73. IPCC, 2007. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (Cambridge Univ. Press, 2007).
74. Moench, M. & Stapleton, S. Water climate risk and adaptation. (Co-operative Programme on Water and Climate, 2007).
75. Fortner, S. K. et al. Elevated stream trace and minor element concentrations in the foreland of receding tropical glaciers. *Appl. Geochem.* 26, 1792–1801 (2011).
76. Gregory, J. M. et al. Twentieth-Century Global-Mean Sea Level Rise: Is the Whole Greater than the Sum of the Parts? *J. Clim.* 26, 4476–4499 (2013).
77. Church, J. A. & White, N. J. A 20th century acceleration in global sea-level rise. *Geophys. Res. Lett.* 33, L01602, doi:10.1029/2005GL024826. (2006).
78. Green, J. A. M. & Bigg, G. R. Impacts on the global ocean circulation from vertical mixing and a collapsing ice sheet. *J. Mar. Res.* 69, 221–244 (2011).
79. Cape, M. R. et al. Circumpolar Deep Water Impacts Glacial Meltwater Export and Coastal Biogeochemical Cycling Along the West Antarctic Peninsula. *Front. Mar. Sci.* 6, 144 (2019).
80. Zemp, M. et al. Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016. *Nature* 568, 382–386 (2019).

81. Rignot, E., Rivera, A. & Casassa, G. Contribution of the Patagonia Icefields of South America to Sea Level Rise. *Science* 302, 434–437 (2003).
82. Casassa, G., Sepúlveda, F. V. & Sinclair, R. M. *The Patagonian Icefields: A Unique Natural Laboratory for Environmental and Climate Change Studies*. Springer Science & Business Media (2012).
83. Jacobsen, D., Milner, A. M., Brown, L. E. & Dangles, O. Biodiversity under threat in glacier-fed river systems. *Nat. Clim. Change* 2, 361–364 (2012).
84. Buytaert, W. et al. Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Sci. Rev.* 79, 53–72 (2006).
85. Favier, V. et al. Evidence of groundwater flow on Antizana ice-covered volcano, Ecuador. *Hydrol. Sci. J.* 53, 278–291 (2008).
86. Villacís, M. Recursos hídricos de origen glaciar en el Ecuador: Caso del volcán Antisana. University of Montpellier (2008).
87. Villacís, M. & Francou, B. Clima, glaciares y páramos: implicaciones para la disponibilidad de recursos hídricos. 1er Congreso Nacional del Clima: El desarrollo económico de Colombia bajo un nuevo escenario climático, Bogotá, Colombia (2010).
88. Veettil, B. K. & Kamp, U. Global Disappearance of Tropical Mountain Glaciers: Observations, Causes, and Challenges. *Geosciences* 9, 196 (2019).
89. Rosenzweig, C. et al. Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems. in *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (ed. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson) 79–131 (Cambridge University Press, 2007).
90. Carey, M., Huggel, C., Bury, J., Portocarrero, C. & Haeberli, W. An integrated socio-environmental framework for glacier hazard management and climate change adaptation: lessons from Lake 513, Cordillera Blanca, Peru. *Clim. Change* 112, 733–767 (2012).
91. Carey, M. Living and dying with glaciers: people's historical vulnerability to avalanches and outburst floods in Peru. *Glob. Planet. Change* 47, 122–134 (2005).
92. Carey, M. *In the shadow of melting glaciers: climate change and Andean society*. (Oxford University Press, 2010).
93. Tiranti, D. & Cremonini, R. Editorial: Landslide Hazard in a Changing Environment. *Front. Earth Sci.* 7, 3 (2019).
94. Wang, S.-J. & Zhou, L.-Y. Integrated impacts of climate change on glacier tourism. *Adv. Clim. Change Res.* 10, 71–79 (2019).
95. Horvath, A. Proyecto de ley sobre valoración y protección de los glaciares. (2006).
96. Fernández, C. & Massa, S. Obsérvase El Proyecto De Ley Registrado Bajo El N° 26.418. Dirección Nacional del Registro Oficial Decreto 1837. (2008).
97. Fundación Ambiente y Recursos Naturales. Informe ambiental 10 años. (2018).
98. Verbist, K. et al. The Impact of Glacier Retreat in the Andes: International Multidisciplinary Network for Adaptation Strategies - Background Papers. (UNESCO, 2017).
99. Colls, A., Ash, N., Ikkala, N. & International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN). Ecosystem-based adaptation a natural response to climate change. (IUCN, 2009).
100. Murcia, C. et al. Challenges and Prospects for Scaling-up Ecological Restoration to Meet International Commitments: Colombia as a Case Study. *Conserv. Lett.* 9, 213–220 (2016).
101. Harris, J. A., Hobbs, R. J., Higgs, E. & Aronson, J. Ecological Restoration and Global Climate Change. *Restor. Ecol.* 14, 170–176 (2006).
102. A. Lhumeau & D. Cordero. Adaptación basada en Ecosistemas: una respuesta al cambio climático. 17 (IUCN, 2012).
103. CAN LA. Glaciares Andinos: La necesidad de una agenda transversal. (2013).



EL CAMBIO CLIMÁTICO Y LA CRIÓSFERA ANDINA

SEPTIEMBRE 2019