

Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2025

Montañas y glaciares Torres de agua



Publicado en 2025 por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
7, Place de Fontenoy, 75352 París 07 SP, Francia

© UNESCO 2025

Este informe es publicado por la UNESCO en nombre de ONU-Agua. La lista de miembros y socios de ONU-Agua se encuentra en el siguiente sitio web: www.unwater.org.

ISBN 978-92-3-300257-9

<https://doi.org/10.54679/FOLJ7303>



Esta publicación está disponible en acceso abierto bajo la licencia Attribution-ShareAlike 3.0 (CC-BY-SA 3.0 IGO) (creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/igo/). Al utilizar el contenido de la presente publicación, los usuarios aceptan las condiciones de utilización del Repositorio UNESCO de Acceso Abierto (www.unesco.org/es/open-access/cc-sa).

La presente licencia se aplica exclusivamente al contenido textual de la publicación. Para la utilización de cualquier material que no esté claramente identificado como perteneciente a la UNESCO, deberá solicitarse autorización previa al propietario de los derechos de autor.

Sección 7.2: Jos Timmerman y Hanna Plotnykova © 2025 Naciones Unidas.

Las imágenes marcadas con un asterisco (*) no están sujetas a la licencia CC-BY-SA y no pueden utilizarse ni reproducirse sin el permiso previo de los titulares de los derechos de autor.

Título original: *The United Nations World Water Development Report 2025 – Mountains and glaciers: Water towers.*

Publicado en 2025 por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.

Los términos empleados en esta publicación y la presentación de los datos que en ella aparecen no implican toma alguna de posición por parte de la UNESCO en cuanto al estatuto jurídico de los países, territorios, ciudades o regiones, ni respecto de sus autoridades, fronteras o límites. Del mismo modo, las fronteras y los nombres mostrados y la designación utilizada en los mapas no implican la aprobación o aceptación oficial por parte de las Naciones Unidas. Existe una disputa entre los Gobiernos de la Argentina y del Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte relativa a la soberanía sobre las Islas Malvinas (Falkland Islands).

Las ideas y opiniones expresadas en esta obra son las de sus autores y no reflejan necesariamente el punto de vista de la UNESCO ni comprometen a la Organización. Los contenidos han sido aportados por los miembros y socios de ONU-Agua, así como por otras personas que figuran en las portadas de los capítulos. La UNESCO y el Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP) no son responsables de los errores en el contenido proporcionado ni de las discrepancias en los datos y el contenido entre los capítulos aportados. El WWAP de la UNESCO ofreció la oportunidad de que los individuos figuraran como autores y colaboradores o de que fueran reconocidos en esta publicación. El WWAP de la UNESCO no es responsable de ninguna omisión en este sentido.

Cita sugerida:

Naciones Unidas, *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2025 – Montañas y glaciares: Torres de agua*. UNESCO, París.

Ilustración de cubierta de Davide Bonazzi.

Traducido por ANEAS.

Diseño gráfico y maquetación de Marco Tonsini.

B R E V E R E S U M E N

Miles de millones de personas dependen del agua dulce que procede de entornos montañosos cada vez más frágiles

Los recursos hídricos que nos ofrecen las montañas se están derritiendo literalmente ante nuestros ojos.

Las montañas y los glaciares alpinos —a menudo denominados “torres de agua” del mundo— son cada vez más vulnerables al cambio climático y a las actividades humanas insostenibles, amenazando los recursos hídricos de los que dependen miles de millones de personas e innumerables ecosistemas.

El *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2025* — **Montañas y glaciares: torres de agua**, llama la atención sobre los servicios y beneficios esenciales que las aguas de montaña y los glaciares alpinos proporcionan a las sociedades, las economías y el medio ambiente. Centrándose en las respuestas técnicas y políticas necesarias para mejorar la gestión del agua en las montañas, el informe abarca cuestiones críticas como el abastecimiento de agua y el saneamiento, la mitigación del cambio climático y la adaptación al mismo, la seguridad alimentaria y energética, la industria, la reducción del riesgo de desastres y la protección de los ecosistemas.

La respuesta a la crisis mundial del agua empieza desde arriba.

**Hasta el 60 % del
agua dulce del
mundo se origina en
las montañas**



“Puesto que las guerras nacen en la mente de los hombres y de las mujeres, es en la mente de los hombres y de las mujeres donde deben erigirse los baluartes de la paz”.



Montañas y glaciares Torres de agua

Prefacio por Audrey Azoulay, <i>Directora General de la UNESCO</i>	x
Prefacio por Álvaro Lario, <i>Presidente de ONU-Agua y Presidente del Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola</i>	xii
Prefacio	xiii
Equipo del WWDR 2025	xv
Agradecimientos	xvi
Resumen ejecutivo	1
Prólogo	10
Tendencias en la demanda y disponibilidad de agua	11
Progreso hacia el logro del ODS 6	13
Referencias.....	17
Capítulo 1: Introducción	18
1.1 Zonas montañosas del mundo	20
1.2 Uso y dependencia de las aguas de las montañas	22
1.3 Poblaciones y comunidades de montaña	24
1.4 Criosfera de montaña, incluidos los glaciares.....	24
Referencias.....	26
Capítulo 2: Cambios en la criosfera e impactos en el agua	27
2.1 Dinámica de la criosfera de montaña	29
2.2 Impactos de los cambios en las condiciones de la nieve y el hielo en las montañas ...	33
2.3 Desafíos de la gestión del agua	40
2.4 Conclusiones	41
Referencias.....	42
Capítulo 3: Alimentación y agricultura	46
3.1 Seguridad alimentaria y agricultura	47
3.2 Desafíos	52
3.3 Respuestas	56
3.4 Conclusiones	60
Referencias.....	61
Capítulo 4: Asentamientos humanos y reducción del riesgo de desastres ..	64
4.1 Retos	65
4.2 Respuestas	68
4.3 Conclusiones	71
Referencias.....	72

Capítulo 5: Industria y energía	74
5.1 Retos.....	76
5.2 Impacto de la contaminación industrial en la calidad del agua	76
5.3 Ejemplos de uso del agua en los sectores industrial y energético	78
5.4 Energía hidroeléctrica en zonas de montaña	80
5.5 Respuestas para un desarrollo industrial inclusivo y sostenible	82
Referencias.....	84
Capítulo 6: Medio ambiente	87
6.1 Servicios ecosistémicos de la criosfera de montaña	88
6.2 Tendencias en la criosfera y los servicios ecosistémicos de las montañas.....	89
6.3 Estrategias de respuesta.....	93
Referencias	98
Capítulo 7: Perspectivas regionales	100
7.1 África Subsahariana	101
7.2 Europa y Asia Central	106
7.3 América Latina y el Caribe	113
7.4 Asia y el Pacífico.....	119
7.5 La región árabe	126
Referencias.....	132
Capítulo 8: Desarrollo de conocimientos y capacidades	139
8.1 Brechas de datos y conocimientos sobre alta montaña.....	140
8.2 Aportaciones del conocimiento indígena, de género y local	147
8.3 Fortalecimiento de capacidades	149
8.4 Intercambio de información y comunicación	151
8.5 Conclusiones	153
Referencias.....	154
Capítulo 9: Gobernanza y financiación	156
9.1 Gobernanza de las aguas de montaña a nivel internacional	157
9.2 Gobernanza regional de las aguas de montaña	159
9.3 Gobernanza de las aguas de montaña a nivel nacional y local.....	162
9.4 Valoración y financiación.....	163
Referencias.....	167
Capítulo 10: Conclusiones	169
Porqué las montañas son importantes para todos.....	170
Estrategias de respuesta: el camino a seguir	171
Epílogo	173
Abreviaturas y acrónimos	174

Cuadros, figuras y tablas

Cuadros

Cuadro 1.1	Delimitación de las regiones de montaña.....	22
Cuadro 2.1	Impacto de la deposición de carbono negro, polvo y otras partículas en el derretimiento de la nieve y el hielo.....	31
Cuadro 2.2	Precaución contra la aplicación del concepto de “pico hídrico” en las políticas hídricas.....	35
Cuadro 2.3	Retoolimentación entre sequía de nieve, incendios forestales y flujo de escombros.....	38
Cuadro 2.4	Gestión de inundaciones por desbordamiento repentino de lagos glaciares en el Perú.....	39
Cuadro 3.1	La seguridad alimentaria y los Objetivos de Desarrollo Sostenible.....	48
Cuadro 3.2	El sistema de terrazas de arroz de Honghe Hani.....	51
Cuadro 3.3	Dependencia de la cuenca indogangética del agua de deshielo de la criosfera para el riego.....	55
Cuadro 3.4	Medida de adaptación innovadora al derretimiento de los glaciares que afecta la disponibilidad de agua para la agricultura de regadío.....	57
Cuadro 3.5	Red Mundial de Sistemas de Garantía Participativa en las Montañas.....	59
Cuadro 4.1	Impactos del desastre de las inundaciones de 2021 en Nepal.....	66
Cuadro 4.2	Sistema de abastecimiento de agua y saneamiento por gravedad basado en la comunidad.....	71
Cuadro 5.1	Proteger los glaciares del impacto de la minería: la mina Pascua-Lama en Chile.....	79
Cuadro 6.1	Los páramos, un ecosistema montañoso único en Sudamérica.....	88
Cuadro 6.2	Enfoques basados en la neutralización de la degradación de las tierras (NDT) en las montañas.....	95
Cuadro 6.3	Acción Andina: restauración del paisaje forestal en los Altos Andes.....	95
Cuadro 6.4	Fortalecimiento de la resiliencia de las montañas: restauración de las cuencas de un torrente en las montañas del Pamir en el Afganistán.....	96
Cuadro 7.1	La importancia de las torres de agua de Madagascar para la agricultura.....	103
Cuadro 7.2	Protección de los glaciares con mantas aislantes.....	108
Cuadro 7.3	Un sistema transfronterizo de alerta temprana de inundaciones basado en la comunidad.....	125
Cuadro 8.1	Red Internacional para la Hidrología de Cuencas Alpinas de Investigación (INARCH).....	143
Cuadro 8.2	Desarrollo conjunto de una estrategia para la investigación sobre el agua para los pueblos indígenas y comunidades locales.....	148
Cuadro 8.3	El Centro de Investigación sobre Ecosistemas de Altura: un legado de ciencia ciudadana en los Alpes.....	151
Cuadro 8.4	Más allá de la capacidad técnica: la importancia de la confianza en el éxito del proyecto.....	153
Cuadro 9.1	Componentes de las iniciativas regionales de gobernanza de las montañas.....	159
Cuadro 9.2	Equipo Especial de Alto Nivel para el Hindu Kush Himalaya (HKH).....	161
Cuadro 9.3	Pérdidas económicas por riesgos naturales en las montañas.....	164
Cuadro 9.4	Factores que incentivan la inversión financiera en las regiones montañosas.....	165

Figuras

Figura P.1	Extracción total de agua en el mundo por principales sectores de uso del agua, 2000-2021 (km ³ /año).....	11
Figura P.2	Extracción de agua por sector (% de la extracción total de agua dulce) por grupo de ingresos, 2020.....	12
Figura P.3	Estado del progreso hacia el logro de las metas del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6, 2024.....	13
Figura P.4	Proporción de la población que utiliza servicios de agua potable gestionados de forma segura, 2022.....	14
Figura P.5	Proporción de la población que utiliza servicios de saneamiento gestionados de forma segura (indicador 6.2.1a de los Objetivos de Desarrollo Sostenible) en diferentes regiones, 2022.....	15
Figura 1.1	Delimitación de las regiones de montaña y densidad de población, 2015.....	21

Figura 1.2	Predicciones relativas a la importancia de las regiones montañosas y a la dependencia de la población, 2041-2050 (SSP2-RCP6.0).....	23
Figura 1.3	Cambios en la masa de los glaciares de todo el mundo, 1950-2020.....	25
Figura 2.1	Procesos hidrológicos y criosféricos de alta montaña que regulan el suministro de agua.....	29
Figura 2.2	Principales cambios criosféricos e hidrológicos en las regiones de alta montaña causados por el calentamiento global del siglo XXI.....	32
Figura 2.3	Cambio porcentual por 1 °C de calentamiento en la frecuencia de eventos de derretimiento de la lluvia sobre nieve (ROS) en alta montaña en todo el mundo, 1982-2014.....	33
Figura 2.4	Cambios en la elevación de la superficie de los glaciares a nivel mundial, 2000-2019.....	34
Figura 2.5	Contribución del derretimiento de los glaciares y las precipitaciones al caudal de los ríos en cuencas importantes con manantiales de montaña.....	36
Figura 2.6	Impacto de los cambios en el clima, el agua y la criosfera en los pueblos indígenas y las comunidades locales de las regiones frías.....	40
Figura 3.1	Diagrama seccional de una ladera con terrazas.....	50
Figura 5.1	Vías de transporte y procesos de deposición de contaminantes en entornos glaciares.....	77
Figura 6.1	(a) Servicios ecosistémicos proporcionados por la criosfera de montaña y los ecosistemas de tierras altas; (b) vínculos entre estos y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).....	90
Figura 7.1	Torres de agua en África.....	102
Figura 7.2	Mapa topográfico de los Alpes.....	107
Figura 7.3	Cordilleras de Tian Shan y Pamir en Asia Central.....	112
Figura 7.4	Principales cadenas montañosas y ríos de América Latina y el Caribe.....	114
Figura 7.5	Balances de masa de los glaciares en toda la región, expresados en metros de agua equivalente (m a.e.) por año de diferentes áreas en la región del Himalaya del Hindu Kush durante los períodos 1975-1999, 2000-2009 y 2010-2019.....	120
Figura 7.6	Número de desbordamientos repentinos de lagos glaciares registrados por década en Asia de alta montaña, de 1830s a 2020s.....	121
Figura 7.7	Disminución pasada y futura prevista del agua renovable per cápita con el crecimiento estimado de la población en la región árabe, 2002-2050.....	126
Figura 7.8	Picos y cordilleras de la región árabe.....	127
Figura 7.9	Series temporales de duración anual de la capa de nieve sobre el Monte Líbano (más de 2 000 metros sobre el nivel del mar), 1970-2100.....	129
Figura 7.10	Series temporales de duración anual de la capa de nieve en las montañas del Atlas (más de 2 000 metros sobre el nivel del mar), 1970-2100.....	129
Figura 7.11	Cambio en la profundidad promedio de la nieve estacional (octubre-marzo) en el Monte Líbano durante los períodos 1981-2000, 2021-2040 y 2041-2060.....	130
Figura 7.12	Cambio en la profundidad media estacional de la nieve (octubre-marzo) en las montañas del Atlas durante los períodos 1981-2000, 2021-2040 y 2041-2060.....	130
Figura 8.1	Distribución histórica mundial de las estaciones hidrometeorológicas por elevación, 1750-2024.....	141
Figura 8.2	Componentes de un sistema de información hidrológica.....	145
Figura 8.3	Marco conceptual que integra los efectos de la contracción criosférica en los aspectos de aprovisionamiento, regulación y cultura de los servicios ecosistémicos.....	146

Tablas

Tabla P.1	Extracción global de agua dulce por sector, 2000 y 2021.....	11
Tabla 5.1	Huella hídrica anual de la minería de bitcoin en el mundo, 2020-2021.....	78

Prefacio

por **Audrey Azoulay**, *Directora General de la UNESCO*

Independientemente de donde vivamos, todos dependemos de algún modo de las montañas y los glaciares, las torres de agua de nuestro planeta.

Las montañas cubren 33 millones de km² de la superficie terrestre y son vitales para el sustento de la vida. En ellas viven más de 1 100 millones de personas, es decir, el 15 % de la población mundial. Además, otros 2 000 millones de personas río abajo dependen de estas reservas naturales de agua dulce procedentes del deshielo de los glaciares.

Estos glaciares —y los más de 3 000 millones de personas e innumerables ecosistemas, como bosques, humedales, suelos y ríos, que dependen de ellos— corren un gran riesgo. El *Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2025* ofrece una visión completa del estado actual de los glaciares y la criosfera, destacando las inmensas amenazas económicas, medioambientales y sociales a las que nos enfrentamos.

El informe revela que los Andes, de los que procede el 50 % del agua del río Amazonas, han perdido entre el 30 % y el 50 % de sus glaciares desde la década de 1980. Se prevé que los glaciares del Monte Kenia, Rwenzori y Kilimanjaro habrán desaparecido por completo en 2040 si no se toman medidas, mientras que el “Tercer Polo” —también conocido como el sistema Hindu Kush-Karakoram-Himalaya— podría perder el 50 % del volumen de sus glaciares, que actualmente abarca 100 000 km², para el año 2100.

Desde un punto de vista crítico, este informe subraya que muchos de los problemas relacionados con la adaptación al clima y la gestión del agua son transnacionales, lo que significa que las soluciones más eficaces requieren un enfoque multilateral.

La UNESCO, como organismo especializado de las Naciones Unidas en ciencias del agua y cooperación, desempeña un papel fundamental en la búsqueda de estas soluciones, mediante la producción y el intercambio de conocimientos, la educación en materia de recursos hídricos y como plataforma para el diálogo internacional.

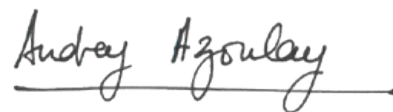
Si no se gestionan adecuadamente, nuestros sistemas hídricos alimentados por montañas y glaciares a menudo corren el riesgo de convertirse en una fuente de conflictos, especialmente a medida que estos recursos esenciales se enfrentan a retos cada vez mayores. Sin embargo, creemos que una gobernanza reforzada de las aguas transfronterizas, apoyada por la cooperación internacional, puede ser un poderoso catalizador para fomentar la paz entre países vecinos. Con este espíritu, en 2022 se creó en la sede de la UNESCO la Coalición para la Cooperación en materia de Aguas Transfronterizas, con el fin de proporcionar una plataforma para la cooperación entre países que dependen de recursos hídricos compartidos, como acuíferos, lagos y cuencas fluviales.

Nuestro Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos, que ha coordinado la elaboración de este informe, está a la vanguardia de la síntesis y difusión de conocimientos sobre la gestión sostenible del agua a escala mundial. Este trabajo nos ayuda a comprender lo que está en juego y qué medidas podemos tomar.

Es esencial que la comunidad internacional aúne esfuerzos y se movilice para proteger los glaciares y la criosfera. Para sensibilizar y promover la acción, la Asamblea General de las Naciones Unidas ha declarado 2025, Año Internacional de la Conservación de los Glaciares. Este es también el primer año del Decenio de Acción para las Ciencias Criosféricas, para el que la UNESCO ha sido designada organismo coordinador.

La producción de este informe, publicado en nombre de toda la familia de ONU-Agua, no habría sido posible sin el apoyo de todos nuestros socios. En particular, la UNESCO da las gracias al Gobierno italiano, que ha apoyado la publicación del informe durante casi dos décadas.

Nos encontramos en un momento crucial para la protección de los sistemas hídricos de nuestro planeta. Espero que este informe sirva de catalizador —a nivel local, nacional e internacional— para una acción rápida y colectiva.



Audrey Azoulay

Prefacio

por **Álvaro Lario**, *Presidente de ONU-Agua y
Presidente del Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola*

Para miles de millones de personas, el agua de deshielo de las montañas es esencial para garantizar el agua potable y el saneamiento, la seguridad alimentaria y energética y la integridad del medio ambiente.

Sin embargo, a medida que el mundo se calienta, hoy los glaciares se están derritiendo más rápido que nunca, lo que hace que el ciclo del agua sea más impredecible y extremo.

Y debido al retroceso de los glaciares, las inundaciones, las sequías, los deslizamientos de tierra y el aumento del nivel del mar se están intensificando, con consecuencias devastadoras para las personas y la naturaleza.

El *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2025 – Montañas y Glaciares: torres de Agua*, ofrece soluciones para ayudarnos a mitigar y adaptarnos simultáneamente a los rápidos cambios que afectan nuestros recursos hídricos congelados.

Este informe ofrece una visión clara de la situación actual y recomendaciones respecto a lo que debe cambiar.

Al detallar las conexiones entre el agua dulce de montaña, los servicios esenciales y el mundo natural, esta publicación destaca la importancia crucial de conservar la criosfera para el logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Se reitera con énfasis la urgente necesidad de reducir drásticamente las emisiones de carbono.

Salvar nuestros glaciares es una estrategia de supervivencia que debemos llevar a cabo juntos. Para ayudar a coordinar el sistema de las Naciones Unidas, 2025 ha sido declarado Año Internacional de la Conservación de los Glaciares y marca el inicio del Decenio de Acción para las Ciencias Criosféricas (2025-2034).

Quisiera expresar mi sincero agradecimiento a los diversos miembros y socios de ONU-Agua y a las personas que aportaron su experiencia a la elaboración de este importante y oportuno informe, y reconocer la inestimable labor de coordinación de la UNESCO y su Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos por lo que concierne a su producción.



Álvaro Lario

Prefacio

por **Michela Miletto**, *Coordinadora del WWAP de la UNESCO*
y **Richard Connor**, *Redactor Jefe*

“Por favor, dígame qué puedo hacer. Debe haber algo que pueda hacer”

Ernest Hemingway, *Las nieves del Kilimanjaro y otros cuentos*

Al igual que las imágenes de osos polares sentados sobre placas de hielo marino congelado que se encogen, las dramáticas fotografías que documentan el rápido retroceso de los glaciares alpinos se han vuelto emblemáticas del impacto de la humanidad en nuestro planeta y su medio ambiente.

La Asamblea General de las Naciones Unidas proclamó 2025 como el Año Internacional de la Conservación de los Glaciares para concienciar sobre el papel vital que desempeñan los glaciares, la nieve y el hielo en el sistema climático y el ciclo del agua, así como sobre los profundos impactos del rápido deshielo de los glaciares. Sin embargo, la criosfera alpina no es el único componente de los sistemas montañosos sujeto al cambio climático y a las actividades humanas insostenibles, que afectan a las “torres de agua” del ciclo hidrológico global. Las montañas de todo el mundo, incluidas las de los trópicos y las islas pequeñas, están experimentando cambios sin precedentes. Y, en última instancia, todos vivimos río abajo.

Como el duodécimo de una serie de informes temáticos anuales, la edición 2025 del *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos* (WWDR) busca explorar la importancia de las aguas de montaña para el desarrollo sostenible y las respuestas políticas y de gestión que deben adoptarse para garantizar su perennidad y maximizar las numerosas oportunidades que ofrecen en un mundo que cambia rápidamente, donde la demanda de agua sigue creciendo y la escasez hídrica aumenta.

Como siempre, el informe ofrece análisis exhaustivos del tema desde diversas perspectivas sociales, económicas y ambientales, que abarcan desde la seguridad alimentaria y energética hasta el abastecimiento de agua, el saneamiento y la reducción del riesgo de desastres. El análisis demuestra cómo las intervenciones en las regiones montañosas afectan a las personas y los ecosistemas río abajo, destacando la necesidad de proteger y gestionar de forma sostenible nuestros frágiles y vulnerables sistemas de torres de agua. Este no es solo un desafío local o regional, sino también global.

El WWDR 2025 presenta los últimos avances científicos sobre el papel de las montañas y los glaciares en la lucha contra la crisis hídrica mundial. Este año, nos hemos esforzado por ofrecer un análisis equilibrado, basado en hechos y neutral del estado actual del conocimiento, que abarca los avances más recientes.

Aunque está dirigido principalmente a las personas encargadas de formular políticas y tomar decisiones, a quienes administran los recursos hídricos, al mundo académico y a la comunidad de desarrollo en general, esperamos que este informe también sea bien recibido por un público no especializado, incluidas las personas que contribuyen a la mitigación de la pobreza y las crisis humanitarias, a la consecución de los derechos humanos al abastecimiento de agua y al saneamiento, y al progreso hacia el logro de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.

Esta última edición del WWDR es el resultado de un esfuerzo conjunto entre las agencias responsables de cada capítulo, mencionadas en los Agradecimientos. El informe también se benefició enormemente de las aportaciones y contribuciones de otros miembros y socios de ONU-Agua, así como de numerosas universidades, instituciones de investigación, asociaciones científicas y organizaciones no gubernamentales, quienes aportaron una amplia gama de materiales relevantes.

En nombre de la Secretaría del Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP), expresamos nuestro más sincero agradecimiento a las agencias mencionadas, a los miembros y socios de ONU-Agua, y a los autores y demás colaboradores por la elaboración conjunta de este informe único y de gran prestigio. Agradecemos profundamente al Gobierno italiano la financiación del WWAP y del WWDR desde 2008, y a la Región de Umbría por acoger generosamente a la Secretaría del WWAP en Perugia (Italia). Sus contribuciones han sido fundamentales para la elaboración del WWDR.

Nuestro agradecimiento especial va a la Sra. Audrey Azoulay, Directora General de la UNESCO, por su continuo apoyo al WWAP y la producción del WWDR, y a Álvaro Lario, Presidente del Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola y Presidente de ONU-Agua.

Finalmente, expresamos nuestro más sincero agradecimiento a todos nuestros colegas de la Secretaría del WWAP, cuyos nombres figuran en los Agradecimientos. El informe no habría sido posible sin su profesionalismo y dedicación.



Michela Miletto



Richard Connor

Equipo del WWDR 2025

Directores de la publicación

Michela Miletto (hasta enero de 2025) y Miguel Doria

Redactor Jefe

Richard Connor

Coordinador del proceso

Engin Koncagül

Asistente de publicaciones

Valentina Abete

Diseñador gráfico

Marco Tonsini

Secretaría del Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP) (2024-2025)

Coordinador interino: Miguel Doria

Coordinadora (hasta enero de 2025): Michela Miletto

Programas: Chorong Ahn, Richard Connor, Laura Veronica Imburgia, Beobkyung Kim, Engin Koncagül, Teresa Liguori, Bhanu Neupane y Laurens Thuy

Publicaciones: Valentina Abete, Martina Favilli y Marco Tonsini

Comunicaciones: Simona Gallese

Administración y apoyo: Barbara Bracaglia, Lucia Chiodini y Arturo Frascani

TI y seguridad: Michele Brensacchi

Agradecimientos

Este informe es publicado por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), en nombre de ONU-Agua, y su producción está coordinada por el Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP). Agradecemos a los miembros y socios de ONU-Agua, así como a otros colaboradores que hicieron posible la elaboración de este informe.

Agencias líderes de los capítulos

Comisiones Regionales de las Naciones Unidas (Comisión Económica para Europa – CEPE, Comisión Económica para América Latina y el Caribe – CEPAL, Comisión Económica y Social para Asia y el Pacífico – CESPAP, Comisión Económica y Social para Asia Occidental – CESPAAO), Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI), Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Organización Meteorológica Mundial (OMM), Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos (ONU-Hábitat) y UNESCO (Programa Hidrológico Intergubernamental – PHI, Oficina en Nairobi y WWAP de la UNESCO).

Colaboradores

Autoridad de Gestión de la Cuenca de los Ríos Bug Occidental y Sian, Centro de Información Científica de la Comisión Interestatal de Coordinación de los Recursos Hídricos de Asia Central (SIC ICWC), Centro Internacional para la Ordenación Integrada de las Montañas (ICIMOD), ESCAP, Instituto de Estudios Comparados sobre Integración Regional de la Universidad de las Naciones Unidas (UNU-CRIS), Instituto de Investigación y Formación Económica y Social sobre Innovación y Tecnología de la Universidad de las Naciones Unidas en Maastricht (UNU-MERIT), Instituto de Medio Ambiente y Seguridad Humana de la Universidad de las Naciones Unidas (UNU-EHS), OMM, ONUDI, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), Red de Abastecimiento de Agua en Zonas Rurales (RWSN), Secretaría de la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CLD), UNESCO-PHI, Universidad de Berna, Universidad Tecnológica de Gdansk.

Donantes

La elaboración del informe contó con el apoyo financiero del Gobierno de Italia y de la Regione Umbria. Agradecemos a todas las personas que aportaron contribuciones en especie y a sus respectivos donantes.

En línea con la designación de 2025 como Año Internacional para la Conservación de los Glaciares y con la resolución de la Asamblea General de las Naciones Unidas del año 2022 sobre el desarrollo sostenible de las montañas, este informe desea llamar la atención internacional sobre la importancia de las aguas de montaña, incluidos los glaciares alpinos, para el desarrollo sostenible de las regiones montañosas y para las sociedades que dependen de ellas río abajo en el contexto de los rápidos cambios que está experimentando la criosfera de montaña.

Estado de los recursos hídricos del mundo

A tenor de las estimaciones mundiales más recientes (de 2021), el sector agrícola domina las extracciones de agua dulce (72 %), seguido de la industria (15 %) y el uso doméstico o municipal (13 %). Las extracciones de agua dulce específicas de cada sector varían considerablemente en función del nivel de desarrollo económico de cada país. Los países con ingresos más altos utilizan más agua para la industria. En cambio, los países con ingresos más bajos utilizan el 90 % (o más) de su agua para el riego agrícola.

Durante el período de 2000–2021, las extracciones mundiales de agua dulce aumentaron un 14 %, lo que equivale a una tasa media de crecimiento de un 0,7 % al año. Gran parte de este incremento se produjo en ciudades, países y regiones que están experimentando un rápido crecimiento económico. El crecimiento demográfico no parece ejercer una influencia significativa en el incremento de la demanda de agua. De hecho, los países en los que el consumo de agua per cápita es más bajo, como varios países de África Subsahariana, a menudo son los que registran un mayor crecimiento demográfico.

Veinticinco países —que concentran un cuarto de la población mundial— se enfrentan cada año a un estrés hídrico extremadamente alto. Alrededor de 4 000 millones de personas, o sea la mitad de la población mundial, sufren una grave escasez de agua por lo menos durante una parte del año.

El cambio climático está acentuando la variabilidad estacional y la incertidumbre sobre la disponibilidad de agua en la mayoría de las regiones. La contaminación, la degradación de tierras y ecosistemas y los peligros naturales pueden comprometer aún más la disponibilidad de recursos hídricos.

Avances hacia el logro del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6

El Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6 apunta a garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible de agua y saneamiento para todos.

El progreso hacia la consecución de las metas del ODS 6 no está avanzando; por lo que concierne a algunas metas, está gravemente estancado.

Por ejemplo, se estima que 2 200 millones de personas (27 % de la población mundial) carecían de acceso a agua potable gestionada de manera segura en 2022; además, cuatro de cada cinco personas que vivían en zonas rurales carecían incluso de servicios básicos de agua potable.

En lo que atañe al saneamiento, la situación es peor: en 2022, 3 500 millones de personas en todo el mundo carecían de acceso a saneamiento gestionado de manera segura. Solo la mitad de la población tenía acceso a estos servicios en América Latina y el Caribe, Asia Central y Meridional. La cobertura en África Subsahariana era solamente del 24 %.

• • •
Por el hecho de ser las “torres de agua” del mundo, las montañas son una fuente esencial de agua dulce

El vacío de datos y las deficiencias en la monitorización siguen impidiendo una evaluación exacta de las demás metas del ODS 6, como las que se refieren a la gestión de los recursos hídricos, la calidad del agua, los ecosistemas relacionados con el agua y el entorno propicio.

Las regiones montañosas

Por el hecho de ser las “torres de agua” del mundo, las montañas son una fuente esencial de agua dulce. Son de capital importancia para satisfacer las necesidades humanas básicas, como el suministro de agua y saneamiento. Estas aguas también son vitales para garantizar la seguridad alimentaria y energética de miles de millones de personas que viven en zonas montañosas, alrededor de ellas y en las zonas situadas río abajo.

Las principales actividades económicas de las regiones montañosas son la agricultura, el pastoreo, la silvicultura, el turismo, la minería, el comercio transfronterizo y la producción de energía. Las regiones de montaña suministran productos de alto valor, como plantas medicinales, madera y otros productos forestales, ganadería de montaña única y especialidades agrícolas. Son focos mundiales de agrobiodiversidad, ya que en las montañas se conservan gran parte de las reservas genéticas de las plantas de cultivo y medicinales.

Las montañas poseen una amplia gama de zonas ecológicas, cada una de las cuales es resultado de una combinación específica de factores, como altitud, geomorfología, aislamiento y condiciones micro-climáticas (por ejemplo, insolación). Por consiguiente, suelen tener una mayor biodiversidad endémica que las tierras más bajas, que incluye importantes variedades genéticas de plantas de cultivo y animales. Del mismo modo, poseen una gama de culturas humanas igual de amplia.

Los glaciares y la criosfera de montaña

La criosfera de montaña es uno de los componentes del Sistema Tierra más sensibles al cambio climático mundial. Las montañas suelen garantizar una mayor escorrentía superficial por unidad de superficie que las tierras bajas, ya que registran más precipitaciones y menos evaporación. Los glaciares alpinos también almacenan y liberan agua, aunque durante períodos de tiempo mucho más largos. En varias regiones de alta montaña, la formación de una capa de nieve estacional proporciona la mayor parte del almacenamiento de agua dulce.

La mayoría de los glaciares del mundo, incluidos los de montaña, están derretándose a un ritmo cada vez mayor. Sin embargo, en la mayoría de las cuencas fluviales con componente criosférico el deshielo de la nieve alimenta más la escorrentía y suele ser considerablemente mayor que el deshielo de los glaciares.

El calentamiento global está acelerando el derretimiento de glaciares, disminuyendo la cobertura de nieve, incrementando el deshielo de permafrost y provocando más lluvias extremas y amenazas naturales. Los cursos de agua procedentes de las montañas se volverán más erráticos, imprevisibles y variables. Los cambios en el calendario y el volumen de los caudales máximos y mínimos, el aumento de la erosión y de la carga de sedimentos repercutirán en la cantidad, la disponibilidad y la calidad de los recursos hídricos río abajo.

El polvo, los depósitos de hollín derivados de la combustión, incluido el carbono negro, y la proliferación microbiana y de algas en la nieve y en la superficie de los glaciares son cada vez más habituales a causa de la mayor frecuencia e intensidad de las tormentas de polvo, la contaminación del aire y los incendios forestales. Al disminuir el albedo de la superficie hasta la siguiente nevada, estos factores pueden acelerar el ritmo de fusión.

● ● ●
El calentamiento global está acelerando el derretimiento de glaciares, disminuyendo la cobertura de nieve, y provocando más lluvias extremas y amenazas naturales

Las consecuencias del cambio climático, como el aumento de las temperaturas, la regresión de los glaciares, el deshielo del permafrost y los cambios en los patrones de precipitaciones, pueden incrementar el riesgo de inundaciones y corrimientos de tierra. Los procesos asociados a estos riesgos, como flujos de escombros e inundaciones, avalanchas, desprendimientos de rocas y cascadas de hielo, corrimientos de tierras e inundaciones por desbordamientos de presas y de lagos glaciares (GLOF, por sus siglas en inglés), pueden constituir una importante amenaza para las comunidades, la fauna y la infraestructura.

Alimentación y agricultura

La agricultura y el pastoreo son recursos esenciales para la subsistencia de la población de las zonas rurales de montaña. Una de cada dos personas que viven en zonas montañosas en los países en desarrollo es vulnerable a la inseguridad alimentaria. La lejanía y la inaccesibilidad, sumadas a la degradación de la tierra (que determina la mala calidad de los suelos) y a las grandes variaciones en el suministro estacional de agua, plantean importantes desafíos para la agricultura de montaña.

Las comunidades de montaña conservan muchas de las variedades de plantas de cultivo y medicinales más raras. Han forjado un valioso patrimonio de conocimientos tradicionales y técnicas de cultivo, de producción ganadera y de recogida de agua que contribuye a mantener ecosistemas enteros.

Los pueblos indígenas de las montañas poseen conocimientos, tradiciones y prácticas únicos y valiosos que contribuyen a la consecución de sistemas alimentarios sostenibles, a la gestión de las tierras y a la conservación de la biodiversidad. El cultivo en terrazas se puede adaptar a las condiciones de las pendientes locales. Entre los numerosos beneficios que aporta cabe destacar el hecho de reducir la escorrentía superficial, facilitar la conservación del agua, reducir la erosión del suelo, estabilizar las laderas, mejorar el hábitat y la biodiversidad y mantener el patrimonio cultural.

Las respuestas a los impactos climáticos en las montañas varían considerablemente, tanto por sus objetivos y prioridades como por la velocidad de implementación, la gobernanza, la modalidad de toma de decisiones y la magnitud de los recursos económicos y de otra naturaleza necesarios para implementarlas. Las respuestas de adaptación generalmente incluyen cambios en las prácticas agrícolas, desarrollo de infraestructura, incluida la infraestructura de almacenamiento de agua, la aplicación del conocimiento indígena, la capacitación de las comunidades y la adaptación basada en los ecosistemas (AbE).

Los asentamientos humanos y la reducción del riesgo de desastres

Alrededor de 1 100 millones de personas viven en regiones montañosas, y dos tercios de ellas se concentran en pueblos y ciudades. El aislamiento de las comunidades de montaña, la dificultad de los terrenos y la mayor exposición a los riesgos naturales a menudo provocan un aumento del precio del transporte, de la infraestructura, de los bienes y de los servicios. Estos factores también plantean un gran desafío para financiar, desarrollar y mantener el suministro de aguas y de sistemas de saneamiento, las redes de drenaje y otras infraestructuras hídricas esenciales.

La urbanización rápida y no planificada de las regiones montañosas también está ejerciendo presión sobre los ecosistemas de montaña frágiles, repercutiendo en la disponibilidad de agua, su calidad y seguridad. Los sistemas de agua y saneamiento descentralizados pueden resultar especialmente eficaces en las regiones de montaña, ya que reducen el riesgo de daños a la infraestructura en las zonas escarpadas más expuestas a frecuentes corrimientos de tierra.



El aislamiento de las comunidades de montaña, la dificultad de los terrenos y la mayor exposición a los riesgos naturales a menudo provocan un aumento del precio del transporte, de la infraestructura, de los bienes y de los servicios

Los riesgos naturales como corrimientos de tierras, terremotos, riadas, GLOF y aludes pueden dañar la infraestructura de suministro de agua y saneamiento e interrumpir el acceso a los servicios de agua, saneamiento e higiene. Dichos riesgos incrementan la vulnerabilidad de comunidades de montaña ya de por sí vulnerables y a menudo marginadas, y desestabilizan algunos de los sectores que generan riqueza en ellas, como la agricultura, el turismo y la biodiversidad.

Entre los ejemplos de acciones de adaptación en regiones montañosas se incluyen: estudios de viabilidad para construir zonas de almacenamiento y desviaciones de emergencia y controlar los vertidos de los lagos glaciares; planificación y gestión de cuencas fluviales para su optimización; monitoreo de los cambios de los glaciares a lo largo del tiempo; establecimiento de sistemas de reducción de riesgo de GLOF y de alerta temprana en las cuencas fluviales con áreas heladas.

Industria y energía

En las zonas de montaña en las que abundan relativamente los recursos hídricos y otros recursos se han desarrollado industrias que dependen del agua. El agua es necesaria no solo para el sector industrial y la generación de energía, sino también para el procesamiento de minerales, la producción de madera y el desarrollo del turismo en las zonas montañosas.

La generación de energía hidroeléctrica es una de las principales industrias de las zonas de montaña. La presencia de desniveles y la forma de los valles de montaña posibilitan la producción de energía hidroeléctrica sin necesidad de construir grandes presas y embalses. Sin embargo, la construcción y presencia de presas y embalses, de líneas de transmisión y subestaciones puede tener un impacto muy negativo en los ecosistemas de montaña frágiles.

Más allá de la disponibilidad de agua, un reto importante para la industria y la producción de energía es la altitud a la que se puede operar. Puesto que dichas condiciones pueden generar ingentes costes de inversión y funcionamiento, las actividades industriales suelen limitarse a aquellas que proporcionan una alta rentabilidad de inversión.

El desarrollo industrial y energético puede afectar a la calidad del agua. Las zonas montañosas aisladas son difíciles de controlar, lo que puede dar pie a extracciones de agua y vertidos incontrolados, incluidos vertidos de contaminantes.

Para hacer que la producción industrial y energética en las zonas montañosas sea sostenible ya existen soluciones, mientras que otras se están desarrollando. La economía circular fomenta la reducción del uso de agua, el reciclaje de las aguas utilizadas y la reutilización de los recursos hídricos. Las tecnologías respetuosas con el medio ambiente comprenden prácticas como el uso de tecnologías menos contaminantes, una mejor gestión de recursos y un reciclaje efectivo de los residuos. La ecologización de las infraestructuras grises o su sustitución por infraestructuras verdes puede ser especialmente eficaz en las zonas de montaña.

Medio ambiente

Los ecosistemas de montaña y de altiplano proporcionan servicios esenciales para la población que vive en las montañas y a miles de millones de personas que viven en las zonas bajas de los valles. La regulación del agua (lo que incluye el almacenamiento de agua y el control de las inundaciones) es uno de los servicios más importantes.

● ● ●
El agua es necesaria no solo para el sector industrial y la generación de energía, sino también para el procesamiento de minerales, la producción de madera y el desarrollo del turismo en las zonas montañosas

Entre otros servicios ecosistémicos esenciales figuran la reducción del riesgo de erosión del suelo y de corrimientos de tierra, el enfriamiento de las temperaturas locales, la captura de carbono, el suministro de alimentos y fibras y el mantenimiento de reservas de recursos genéticos para cultivos y ganado adaptados a las condiciones locales.

Se estima que los bosques cubren el 40 % de las áreas montañosas y desempeñan una función protectora frente a los riesgos naturales, ya que estabilizan las laderas escarpadas, regulan los cursos de agua hacia los acuíferos subterráneos, reducen la escorrentía superficial y la erosión del suelo y mitigan el riesgo potencial de corrimientos de tierra e inundaciones. El cultivo insostenible de árboles puede producir una mayor erosión del suelo y reducir la infiltración de aguas en el terreno.

Los suelos de montaña se desarrollan en condiciones climáticas duras. Son muy distintos de los suelos de las tierras bajas, ya que son menos profundos y más vulnerables a la erosión. Con frecuencia las diferentes actividades humanas pueden degradar fácilmente estos suelos, especialmente al eliminar la vegetación que deja expuesto el suelo pelado. La recuperación de los suelos degradados y, por consiguiente, de los ecosistemas de altura es lenta.

A nivel de ecosistema, la mayoría de las opciones para abordar los impactos de los cambios que se producen en la criosfera y en alta montaña incluyen la conservación y restauración de la funcionalidad de los ecosistemas para mantener o mejorar los servicios ecosistémicos de escala local a escala regional mediante soluciones basadas en la naturaleza (SBN) o AbE. Actualmente es frecuente que estos enfoques se consideren como un componente de adaptación en las contribuciones determinadas a nivel nacional de muchos países del mundo.

Perspectivas regionales

África Subsahariana

El 20 % de la superficie de África continental está clasificada como zona montañosa con más de 1 000 metros de altitud sobre el nivel del mar (m s.n.m.), mientras que un 5 % sobrepasa los 1 500 m s.n.m. África Oriental es la región más montañosa del continente. Las regiones montañosas se distinguen por los altos niveles de biodiversidad; proporcionan servicios ecosistémicos, incluidos recursos hídricos, a millones de personas. En el África Subsahariana tropical y subtropical, las montañas disfrutan de condiciones ambientales favorables y de más recursos en comparación con las tierras bajas que las rodean, que generalmente son más secas.

La producción agrícola y la seguridad alimentaria de las regiones montañosas y de las tierras bajas situadas río abajo dependen sobremanera de las aguas de montaña. La degradación de los ecosistemas de montaña reduce su capacidad de almacenar y proveer aguas valle abajo. Esto sucede sobre todo cuando se deforestan bosques de montaña de importancia vital.

Habida cuenta de que la agricultura es el principal medio de subsistencia en las montañas del África Subsahariana, mejorar las prácticas agrícolas para reducir la degradación del terreno (conservación del suelo) es de fundamental importancia. Promover una AbE (por ejemplo, reforestar y conservar los bosques de montaña para reducir la erosión del suelo) puede mejorar la retención del agua y la recarga de los acuíferos y reducir el riesgo de sufrir amenazas naturales.

Las montañas de la región registran altos niveles de crecimiento demográfico y de densidad de población, la pobreza está extendida y faltan medios de subsistencia alternativos y resilientes. En muchas zonas, las montañas están más pobladas que las tierras bajas.

● ● ●
Los glaciares alpinos están desapareciendo a un ritmo alarmante

Europa y Asia Central

Las cadenas montañosas son los manantiales de muchos ríos de Europa y Asia Central. El deshielo de las nieves y los glaciares alpinos garantiza el vertido lento de aguas a las zonas situadas valle abajo. Sin embargo, el cambio climático está anticipando el deshielo estacional de las nieves y está reduciendo los glaciares y, por consiguiente, amenazando la disponibilidad de agua en la temporada de verano. Esto conlleva graves consecuencias para las poblaciones de las cuencas inferiores.

El agua proveniente de los Alpes es de vital importancia para varias zonas de Europa. La generación de energía hidroeléctrica es el principal motivo de la extracción de agua; otros usos incluyen las actividades industriales, el riego agrícola y la fabricación de nieve.

Los Cárpatos albergan aproximadamente el 30 % de la flora europea. Sus hábitats seminaturales, como los pastizales de montaña y prados de heno son de gran importancia ecológica y cultural.

En las montañas de Asia Central los países situados río arriba sufren recortes energéticos en invierno y desean expandir su producción de energía hidroeléctrica; en cambio, los países situados río abajo dependen en gran medida del agua de las montañas para su producción agrícola en verano. Este conflicto en las demandas estacionales provoca tensiones políticas entre los países ribereños.

Es necesario mejorar el intercambio de conocimientos e información, fomentar la cooperación regional, reforzar las capacidades nacionales de gestión de la criosfera y de las aguas de montaña, además de sensibilizar e involucrar a las principales partes interesadas en el desarrollo e implementación de planes de acción.

América Latina y el Caribe

Las montañas ocupan aproximadamente un tercio del territorio de América Latina y el Caribe y producen más caudal de agua por superficie terrestre que cualquier otro continente. Los glaciares de toda la región están experimentando una importante reducción global de su volumen y varios han desaparecido por completo.

El agua procedente de las montañas es esencial para producir cultivos de alto valor como el café y el cacao. Las aguas de las montañas también generan la mayor parte de la energía hidroeléctrica de la región y proporcionan energía a las ciudades y a las comunidades más pequeñas situadas río abajo, así como a las aldeas remotas de las zonas montañosas.

Las áreas montañosas de América Latina y el Caribe se ven cada vez más afectadas por el cambio climático y las actividades humanas. En zonas de gran altitud de los países andinos se han producido conflictos sociales relacionados con el agua, muchos de los cuales pueden atribuirse, en parte, a las actividades mineras, que pueden repercutir negativamente en la disponibilidad de agua para los usuarios situados río abajo.

Como respuesta varios países han promulgado políticas y leyes para proteger estos ecosistemas esenciales. Sin embargo, algunos sistemas ya han superado los umbrales críticos, por lo que resulta perentorio promover medidas de adaptación como las soluciones basadas en la naturaleza (por ejemplo, la reforestación), las técnicas de cultivo y la ampliación de las infraestructuras de recogida de agua. Para aplicar estas medidas de forma eficaz, se necesita una financiación bien orientada, una monitorización sólida, capacitación y unos marcos de gobernanza inclusivos, que fomenten el diálogo y la inclusión de las comunidades lugareñas para aplicar las mejores prácticas disponibles adaptadas a los contextos locales de las regiones montañosas.

● ● ●
**Es necesario
ampliar la
infraestructura
de observación en
las zonas de alta
montaña**

Asia y el Pacífico

La región de Asia y el Pacífico posee algunas de las montañas más altas del mundo y algunos de los sistemas glaciares más amplios. El que se conoce como Tercer Polo almacena más hielo y nieve que cualquier otra región, con excepción de la Antártida y el Ártico. En él nacen más de diez sistemas fluviales que son vitales para mantener a casi 2 000 millones de personas en las cuencas fluviales de Asia Central, Nororiental, Meridional y Sudoriental. El Tercer Polo es una de las zonas del mundo más diversas biológicamente y más frágiles ecológicamente y alberga una amplia diversidad de culturas.

Los glaciares alpinos de la región están desapareciendo a un ritmo alarmante, con frecuencia más rápido que la media global. A largo plazo, se prevé que la reducción de los caudales de agua y el aumento de las sequías pondrán en peligro la seguridad alimentaria, hídrica y energética de la región de Hindú Kush Himalaya.

El uso de energía, la degradación medioambiental y las actividades humanas están contribuyendo a crear otros riesgos: en el Tercer Polo se ha registrado una presencia cada vez mayor de carbono negro, metales pesados y contaminantes orgánicos persistentes.

La colaboración para involucrar a las distintas partes interesadas y a los sectores afectados por estas tendencias es esencial. El deshielo de glaciares y las crisis relacionadas con el agua se han de abordar reforzando las medidas de adaptación, mediante una gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) y soluciones sinérgicas para el clima, la naturaleza y la contaminación, reforzadas por la colaboración transfronteriza, el diálogo regional y actividades de promoción y sensibilización.

La región árabe

A menudo las montañas de la región árabe no reciben la debida atención, a pesar del importante papel que desempeñan a la hora de suministrar recursos hídricos y otros servicios ecosistémicos. Albergan comunidades prósperas y centros de actividad económica relacionada con el turismo, la agricultura y la industria, que a menudo dependen de una disponibilidad menguante de recursos hídricos, lo cual se traduce en una menor cantidad de agua renovable per cápita.

Las aguas de deshielo pueden desempeñar un papel crucial para el sector agrícola, especialmente para mantener los cultivos durante el verano, cuando escasean las precipitaciones. Algunas fuentes de la región árabe alimentadas por acuíferos se recargan fundamentalmente con aguas de deshielo de las nieves. Se prevé que en la Cordillera del Líbano y en la del Atlas disminuirán las nevadas de temporada y las precipitaciones totales, lo cual afectará a la duración y al espesor de la capa de nieve, así como a la disponibilidad de recursos de agua dulce. Estas proyecciones sobre la reducción de la capa de nieve apuntan a un descenso general del suministro de agua, sobre todo durante la estación seca, cuando más se necesita para el regadío. Los servicios hídricos, de saneamiento e higiene también se pueden ver afectados por la disminución general de recursos hídricos a largo plazo.

La recarga gestionada de acuíferos es una medida de adaptación que podría emplearse. Se podría utilizar el agua almacenada en invierno para abordar la menor disponibilidad de agua en verano debida a los efectos del cambio climático en las zonas montañosas de la región árabe, como por ejemplo la pérdida del manto de nieve.

Desarrollo de conocimientos y capacidades

La alta variabilidad del clima, la topografía, geología y vegetación de las zonas montañosas —factores todos ellos que influyen en el movimiento de las aguas por dichas zonas— hacen que redes hidrometeorológicas representativas y sistemas de información robustos resulten especialmente necesarios.

La escasa monitorización de la criosfera en las regiones montañosas exacerba la incertidumbre de las predicciones hidro-glaciológicas, con el consiguiente aumento del riesgo de una mala gestión de los recursos hídricos. Para comprender los cambios de la criosfera y mejorar la sostenibilidad de los enfoques de mitigación y adaptación, es necesario ampliar la infraestructura de observación en las zonas de alta montaña y que los datos sean de libre acceso.

El compromiso y la colaboración significativa con los pueblos indígenas y las comunidades locales, con su previo consentimiento informado y la voluntad de aprender de formas de administración de los sistemas hídricos que se han forjado a lo largo de generaciones, mejorarán la capacidad colectiva de responder a los cambios de la criosfera montañosa y de las condiciones hidrológicas de los valles.

A nivel institucional es necesario definir el tiempo y los recursos necesarios para reunir a distintas personas y perspectivas. A menudo, los modelos de gobernanza colaborativa conllevan una serie de compromisos que, a pesar de ser ventajosos para la sociedad a largo plazo, pueden resultar indeseables para los actuales beneficiarios del *statu quo*.

La participación en proyectos de ciencia ciudadana puede abrir valiosas vías para el compromiso público con el medio ambiente local, mejorar la alfabetización científica y fomentar las carreras de investigación. La colaboración entre las organizaciones de investigación y los grupos comunitarios, en cuyo marco los investigadores y las investigadoras desarrollan métodos y proyectos de educación y formación, es un enfoque habitual para garantizar que se cumpla este requisito. En dicho proceso, la población local debería aportar ideas sobre el alcance del proyecto para cerciorarse de que los resultados en términos de conocimiento satisfagan las necesidades de su comunidad.

Gobernanza y financiación

El papel de la gobernanza del agua en las montañas no ha cobrado la misma atención que en las tierras bajas, donde se ha llevado a cabo mucho trabajo, por ejemplo, por medio de la GIRH.

Los marcos políticos internacionales ofrecen un apoyo prometedor a la gobernanza del agua y a la adaptación a los cambios climáticos en las montañas. Los tratados y los convenios son instrumentos importantes para promover estrategias de cooperación y su implementación en las regiones montañosas.

La mayoría de los grandes ríos nacen en zonas montañosas y a menudo atraviesan las fronteras internacionales. La gobernanza de aguas transfronterizas basada en una “visión a nivel de cuenca” que tenga en cuenta las aguas de montaña puede proporcionar beneficios a los países ribereños. La cooperación regional entre Estados, incluidas las iniciativas de gobernanza de las cuencas fluviales, es un mecanismo importante para promover la adaptación al clima en las montañas. Sin embargo, el conflicto entre los intereses nacionales en el marco de los acuerdos sobre aguas transfronterizas y la ineficacia de las instituciones para llevar a cabo la coordinación dentro del contexto local han entorpecido una cooperación eficaz.

● ● ●
En algunos casos, las políticas nacionales en materia de agua, agricultura, industria y energía se diseñan para favorecer a las regiones bajas de las cuencas fluviales

La gestión de las aguas de montaña se ha de realizar ante todo dentro de las fronteras de los países, por medio de legislación, políticas y estrategias nacionales. En algunos casos, las políticas nacionales en materia de agua, agricultura, industria y energía se diseñan para favorecer a las regiones bajas de las cuencas fluviales, por ejemplo, para atender a las zonas más pobladas. A menudo se da el caso de que las políticas nacionales no reflejan plenamente los problemas sectoriales relacionados con el agua en las montañas; es más, que contemplan las montañas como fuentes para los usuarios situados río abajo.

Generalmente el desarrollo en las montañas resulta más caro y complicado que en las tierras bajas, debido a la presencia de terrenos escarpados y de difícil acceso, a las restricciones de las economías de escala, a las largas distancias que separan esas zonas de los puertos marítimos y de los centros económicos, así como a la falta de desarrollo de los sectores industrial y de servicios. Los costes relacionados con transporte, infraestructura, bienes y servicios aumentan con la altitud y el aislamiento. Todos estos costes se han de tener en cuenta en el marco de las políticas y la financiación, haciendo llamamientos para incluir políticas y programas específicos para montañas en los planes de desarrollo nacionales y globales.

La financiación para la adaptación al clima y la inclusión y contribución del sector privado son factores clave para alcanzar el potencial de adaptación en las montañas. A pesar de que existe una cuantiosa financiación potencialmente disponible para invertir en el desarrollo sostenible de las regiones montañosas, el acceso a los principales programas de apoyo ha sido relativamente limitado. Esto indica que se está infrautilizando una importante opción de respuesta. A nivel más específico, deberían mobilizarse fondos locales, nacionales, regionales e internacionales innovadores y asequibles para respaldar la planificación en materia de agua, agricultura y energía, así como la inversión en la infraestructura.

Epílogo

Las montañas suministran agua dulce vital para miles de millones de personas e innumerables ecosistemas. Al ser las torres de agua del mundo, no se puede ignorar el papel crítico que desempeñan con respecto al desarrollo sostenible.

Se han de emprender acciones para comprender mejor y proteger estos entornos frágiles, que se ven crecientemente amenazados por el cambio climático y actividades humanas insostenibles.

Porque nada de lo que sucede en las montañas se queda en las montañas.

De una manera u otra, ***todos vivimos a los pies de una montaña.***

Prólogo

WWAP de la UNESCO

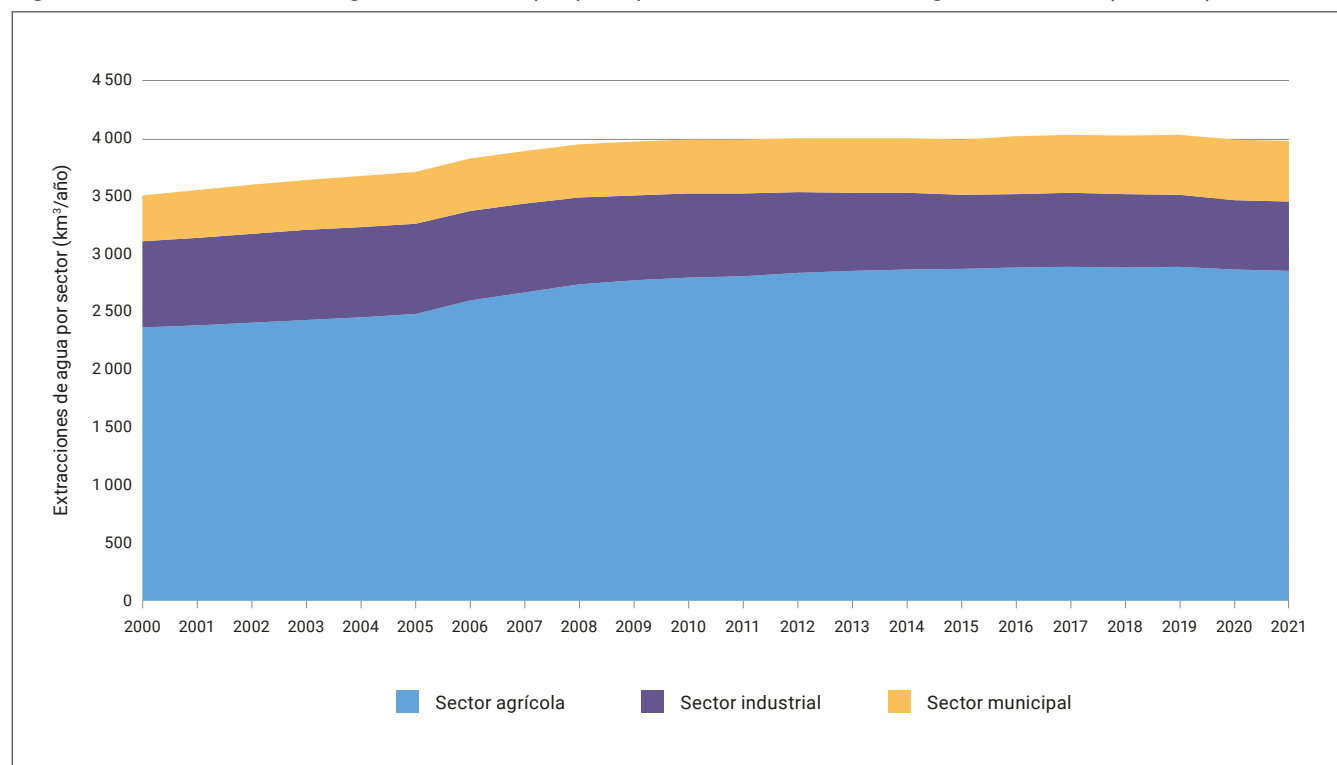
Richard Connor, Chorong Ahn y Beobkyung Kim

Tendencias en la demanda y disponibilidad de agua

Según las estimaciones mundiales más recientes (de 2021; FAO, s.f.), el sector agrícola domina las extracciones totales de agua (72 %), seguido de la industria (15 %) y el uso doméstico o municipal (13 %; figura P.1).

Durante el período 2000-2021, la extracción total de agua creció un 14 % a nivel mundial (de 3 500 km³ en 2000 a poco menos de 4 000 km³ en 2021), lo que equivale a un incremento promedio del 0,7 % anual. Sin embargo, este crecimiento no ha sido uniforme en todos los sectores. El mayor incremento se ha producido en el sector agrícola (que extrae el agua para el riego, la ganadería y la acuicultura), seguido del sector de uso municipal (que comprende sobre todo el agua extraída para uso directo de la población). La extracción de agua dulce por parte de la industria (autoabastecimiento) parece haber disminuido casi un 20 % durante el mismo período (tabla P.1).

Figura P.1 Extracción total de agua en el mundo por principales sectores de uso del agua, 2000-2021 (km³/año)



Fuente: autores, a partir de datos de AQUASTAT (FAO, s.f.).

Tabla P.1 Extracción global de agua dulce por sector, 2000 y 2021

Año	Sector agrícola		Sector industrial		Sector municipal	
	Volumen (km ³)	Porcentaje del total (%)	Volumen (km ³)	Porcentaje del total (%)	Volumen (km ³)	Porcentaje del total (%)
2000	2 365	67	746	21	396	11
2021	2 855	72	601	15	528	13

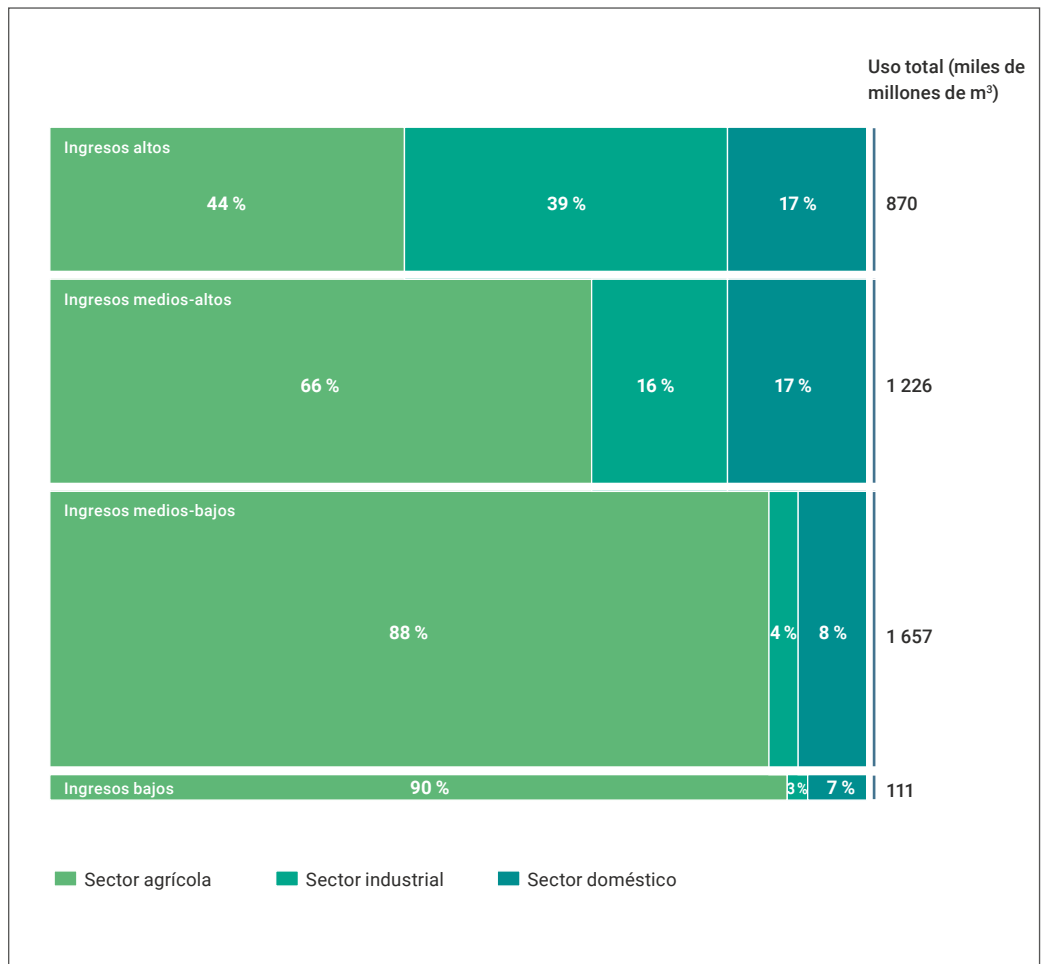
Fuente: autores, a partir de datos de AQUASTAT (FAO, s.f.).

Las extracciones de agua dulce por sector varían considerablemente en función del nivel de desarrollo económico de los países. Los países de ingresos más altos utilizan más agua para la industria, mientras que los países de ingresos más bajos destinan el 90 % (o más) de su agua al riego agrícola (figura P.2).

Figura P.2
Extracción de agua por sector (% de la extracción total de agua dulce) por grupo de ingresos, 2020

Nota: los datos del sector "doméstico" en esta figura son los mismos que los del sector "municipal" en la figura P.1 y la tabla P.1.

Fuente: Kashiwase y Fujs (2023, a partir de datos de AQUASTAT). Licencia CC BY 3.0 IGO.



Sin embargo, aún no está claro en qué medida la disminución de las extracciones industriales mencionada anteriormente se relaciona con una mayor eficiencia en el uso del agua por parte de las industrias en los países de ingresos altos y medios-altos. Este puede ser un tema que valga la pena investigar.

● ● ●
El aumento de la demanda de agua se produce sobre todo en ciudades, países y regiones que experimentan un rápido desarrollo económico

Las tendencias futuras de la demanda de agua son notoriamente difíciles de estimar (Naciones Unidas, 2023). En general, el aumento de la demanda se debe principalmente al desarrollo socioeconómico y a los cambios conexos en los patrones de consumo, incluida la dieta. Dicho aumento se produce sobre todo en ciudades, países y regiones que experimentan un rápido desarrollo económico, especialmente en las economías emergentes. Sin embargo, el crecimiento poblacional no parece desempeñar un papel muy significativo al respecto. De hecho, los países con el menor consumo de agua per cápita, incluidos varios países del África Subsahariana, suelen ser aquellos con el crecimiento poblacional más rápido (Naciones Unidas, 2024a).

Aunque las definiciones varían, la disponibilidad (o escasez) de agua puede verse como una medida puramente volumétrica, mientras que el estrés hídrico corresponde a la disponibilidad del recurso en función de la demanda (es decir, la capacidad, o la falta de ella, para satisfacer la demanda humana y ecológica de agua).

Progreso hacia el logro del ODS 6

Veinticinco países, donde vive una cuarta parte de la población mundial, se enfrentan a un estrés hídrico extremadamente alto cada año (Kuzma et al., 2023). La disponibilidad de agua suele variar según el lugar y el momento, de modo que los promedios anuales de disponibilidad de agua pueden enmascarar una grave escasez de agua (es decir, estrés) que puede ocurrir durante meses o estaciones específicas a lo largo del año. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático estima que aproximadamente 4 000 millones de personas, o sea la mitad de la población mundial, experimentan una grave escasez de agua durante al menos parte del año (IPCC, 2023).

El cambio climático está incrementando la variabilidad estacional del agua y la incertidumbre sobre su disponibilidad en la mayoría de las regiones (UNESCO/ONU-Agua, 2020; IPCC, 2023). La contaminación, la degradación de las tierras y los ecosistemas, y los riesgos naturales pueden comprometer aún más la disponibilidad de los recursos hídricos y los sectores que dependen de ellos.

El Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6 busca garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos. Se centra en el agua potable, el saneamiento y la higiene, la gestión sostenible de los recursos hídricos, la calidad del agua, la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH), los ecosistemas relacionados con el agua y el entorno propicio.

El progreso hacia la consecución de todas las metas del ODS 6 está retrasado, en algunos casos de forma grave (figura P.3). La falta de datos y las deficiencias en el monitoreo siguen impidiendo una evaluación precisa y la implementación eficaz de las intervenciones necesarias¹.

Figura P.3
Estado del progreso hacia el logro de las metas del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6, 2024



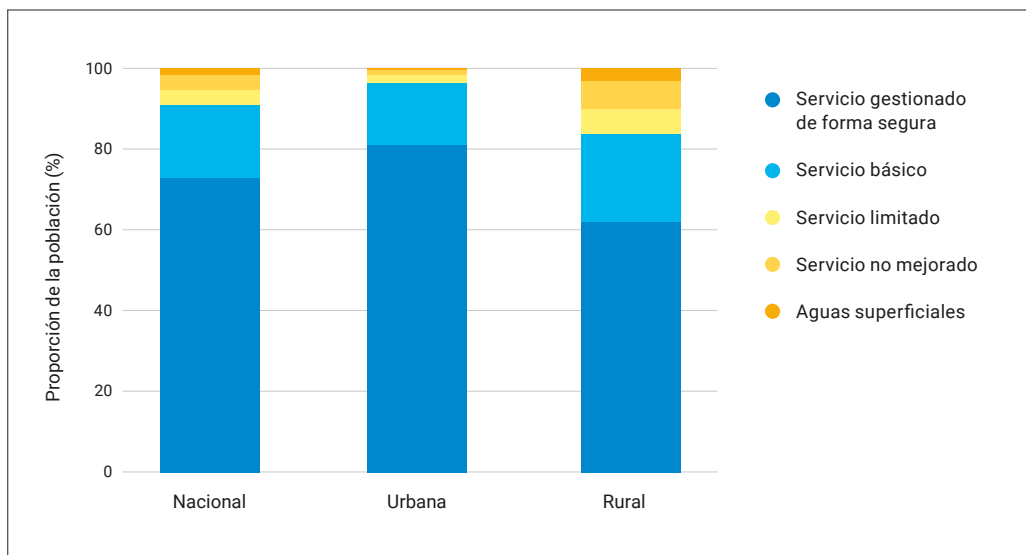
Fuente: Naciones Unidas (s.f.a).

¹ Para obtener métricas detalladas y actualizadas, información complementaria y enlaces a informes de referencia sobre el progreso hacia la consecución de todas las metas e indicadores del ODS 6, consulte www.sdg6data.org.

Meta 6.1: agua potable segura

Se estima que 2 200 millones de personas (el 27 % de la población mundial) carecían de acceso a agua potable gestionada de forma segura en 2022 (figura P4). Cuatro de cada cinco personas que carecían de servicios básicos de agua potable vivían en zonas rurales. La brecha de cobertura entre zonas urbanas y rurales era mayor en África Subsahariana y América Latina y el Caribe (UNICEF/OMS, 2023).

Figura P.4
Proporción de la población que utiliza servicios de agua potable gestionados de forma segura, 2022



Fuente: Naciones Unidas (s.f.b.), a partir de datos de UNICEF/OMS (2023).

Meta 6.2: acceso a servicios de saneamiento e higiene

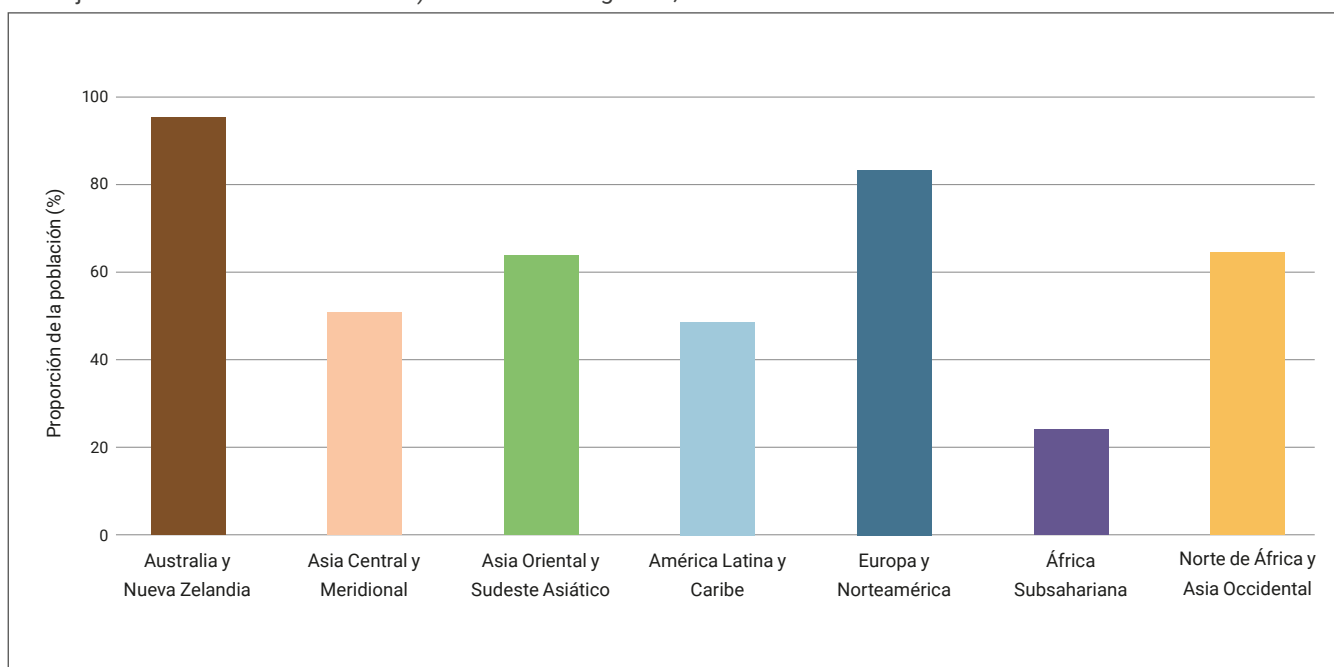
En 2022, 3 500 millones de personas en todo el mundo carecían de acceso a servicios de saneamiento gestionados de forma segura (UNICEF/OMS, 2023). La situación era especialmente grave en África Subsahariana, donde tan solo el 24 % de la población utilizaba servicios de saneamiento gestionados de forma segura. Sigue habiendo barreras de este tipo en otras regiones, como América Latina y el Caribe, y Asia Central y Meridional, donde solo el 50 % de la población aproximadamente tenía acceso a estos servicios (figura P.5).

Meta 6.3: calidad del agua

El indicador 6.3.1 de los ODS rastrea la proporción del total de aguas residuales (industriales y domésticas) tratadas de forma segura de conformidad con las normas nacionales o locales. El componente doméstico incluye aguas residuales y lodos fecales, tratados *in situ* o fuera del sitio, y se vincula con el indicador 6.2.1a sobre saneamiento. Lamentablemente, *“existe una alarmante falta de estadísticas sobre aguas residuales comunicadas por los países de todo el mundo”,* y los *“datos son insuficientes para establecer estadísticas mundiales sobre la proporción de las aguas residuales totales y tratadas de manera adecuada”* (ONU-Hábitat/OMS, 2024, p. xiii).

En 2023, los datos sobre 91 000 masas de agua ubicadas en 120 países revelaron que el 56 % presentaba buena calidad del agua (Naciones Unidas, 2024b). *“Sin embargo, la recopilación de datos y la presentación de informes sobre parámetros básicos de calidad del agua están más allá de la capacidad de muchos países de ingresos bajos y medios-bajos. En 2023, se utilizaron más de 2 millones de mediciones de la calidad del agua para informar sobre este indicador [6.3.2], pero la mitad de los países de ingresos más bajos del mundo contribuyeron con menos del 3 % del total de dichas mediciones (60 000)”* (PNUMA, 2024a, pp. ix-x).

Figura P.5 Proporción de la población que utiliza servicios de saneamiento gestionados de forma segura (indicador 6.2.1a de los Objetivos de Desarrollo Sostenible) en diferentes regiones, 2022



Fuente: Naciones Unidas (s.f.c., a partir de datos de UNICEF/OMS (2023)).

Meta 6.4: eficiencia en el uso del agua y nivel de estrés hídrico

“Aumentar la eficiencia en el uso del agua, por ejemplo reparando las fugas de los sistemas de distribución de agua, utilizando cultivos menos sedientos e invirtiendo en nuevas tecnologías, da lugar a sistemas de producción alimentaria e industrial más sostenibles. El ahorro de agua también suele ir asociado a un ahorro de energía, ya que es necesario extraer, tratar, transportar y calentar menos agua” (Naciones Unidas, s.f.d). El indicador de este objetivo (6.4.1) controla el cambio en la eficiencia del uso del agua a lo largo del tiempo, estimado como la relación entre el valor añadido en dólares y el volumen de agua utilizado.

La eficiencia varía considerablemente, influenciada por la estructura económica de un país y la distribución sectorial del agua. Por ejemplo, “en 2021, las estimaciones oscilaban entre menos de 3 dólares/m³ en las economías dependientes de la agricultura y más de 50 dólares/m³ en las altamente industrializadas y basadas en servicios. Si bien la eficiencia en el uso del agua ha aumentado en promedio a nivel mundial, todavía es baja en el 58 % de los países aproximadamente (menos de 20 dólares/m³)” (Naciones Unidas, 2024b, p. 21).

El monitoreo de los niveles de estrés hídrico permite estimar la presión que ejercen todos los sectores sobre los recursos renovables de agua dulce del país. El indicador 6.4.2 de los ODS alcanzó el 18,6 % en 2021, lo que representa un aumento del 2,7 % desde 2015 (FAO/ONU-Agua, 2024).

Meta 6.5: cooperación en materia de aguas transfronterizas

De los 153 países que comparten ríos, lagos y acuíferos transfronterizos, solo 43 tienen el 90 % o más de sus aguas transfronterizas cubiertas por acuerdos operativos; solo 26 países tienen todas sus aguas transfronterizas cubiertas por acuerdos de ese tipo (CEPE/UNESCO/ONU-Agua, 2024).

El indicador 6.5.1 de los ODS mide el nivel de implementación de la GIRH. *“El progreso en la implementación de la gestión integrada de los recursos hídricos sigue siendo lento en todo el mundo, y ha aumentado ligeramente del 49 % en 2017 a tan solo el 57 % en 2023. [...] Se requieren esfuerzos significativos para acelerar dichos avances, en particular en Asia Central y Meridional, América Latina y el Caribe, Oceanía y África Subsahariana”* (Naciones Unidas, 2024b, p. 21).

Meta 6.6: ecosistemas relacionados con el agua

Esta meta abarca el amplio y ambicioso objetivo de proteger y restaurar los ecosistemas relacionados con el agua, como montañas, bosques, humedales, ríos, acuíferos y lagos. Cabe destacar que no está cuantificada a nivel global. Por lo tanto, no proporciona información sobre el objetivo expresado como número o superficie de ecosistemas relacionados con el agua que requieren protección y/o restauración. Sin embargo, *“las tendencias de los datos del indicador 6.6.1 muestran que los ecosistemas relacionados con el agua siguen enfrentándose a niveles significativos de degradación. Esto se debe principalmente a la contaminación, las presas, la conversión de tierras, la extracción excesiva y el cambio climático”* (PNUMA, 2024b, p. 2).

Meta 6.a: cooperación internacional en materia de agua y saneamiento

Los desembolsos de la ayuda oficial al desarrollo (AOD) al sector del agua disminuyeron de manera constante entre 2018 y 2020, para luego aumentar un 11 % hasta alcanzar los 9 100 millones de dólares estadounidenses en 2021 (Naciones Unidas, s.f.e). *“Sin embargo, los desembolsos de la AOD al sector del agua como porcentaje de la AOD total para todos los sectores disminuyeron al 3,2 % en 2022, un mínimo histórico, y continuaron una tendencia a la baja que se ha acelerado desde el inicio de la pandemia de COVID-19 en 2020”* (OMS, 2024, p. 40).

Meta 6.b: gestión participativa del agua y del saneamiento

En el marco de las encuestas que se llevaron a cabo entre 2021 y 2022, más del 90 % de los países declararon tener procedimientos de participación definidos en leyes o en las políticas para la gestión del agua potable y los recursos hídricos en zonas rurales. Sin embargo, *“menos de un tercio de los países declararon contar con una participación alta o muy alta de las comunidades en los procesos de planificación y gestión”* (OMS, 2022, p. 48).

Referencias

- CEPE/UNESCO/ONU-Agua (Comisión Económica para Europa/Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura/ONU-Agua). 2024. *Avances en la cooperación en materia de aguas transfronterizas: Estado intermedio del indicador 6.5.2 de los ODS, centrado especialmente en el cambio climático*. Ginebra/París, Naciones Unidas/UNESCO. unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000392087.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). s.f. AQUASTAT Dissemination System. Sitio web de la FAO. data.apps.fao.org/aquastat/?lang=en (consultado el 2 de diciembre de 2024).
- FAO/ONU-Agua (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura/ONU-Agua). 2024. *Progresos en el nivel de estrés hídrico: Situación a mitad de período del Indicador 6.4.2 de los ODS y necesidades de aceleración, con especial atención a la seguridad alimentaria, 2024*. Roma, FAO. openknowledge.fao.org/items/b1457b8b-6b02-4293-b6dc-6d308b164641.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2023. Summary for policymakers. H. Lee y J. Romero (eds), *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, IPCC, pp. 1-34. www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf.
- Kashiwase, H. y Fujs, T. 2023. Presiones sobre los recursos de agua dulce. A. F. Pirlea, U. Serajuddin, A. Thudt, D. Wadhwa y M. Welch (eds), *El Atlas de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2023*. Washington DC, Banco Mundial. datatopics.worldbank.org/sdgoalatlas/goal-6-clean-water-and-sanitation?lang=es.
- Kuzma, S., Saccoccia, L. y Chertock, M. 2023. 25 Countries, Housing One-Quarter of the Population, Face Extremely High Water Stress. Sitio web del Instituto de Recursos Mundiales. www.wri.org/insights/highest-water-stressed-countries.
- Naciones Unidas. 2023. *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2023: Alianzas y cooperación por el agua*. París, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000386807.
- . 2024a. *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2024: Agua para la prosperidad y la paz*. París, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000391195.
- . 2024b. *The Sustainable Development Goals Report 2024*. Nueva York, Naciones Unidas. unstats.un.org/sdgs/report/2024/.
- . s.f.a. SDG Progress by Target. Sitio web de las Naciones Unidas. unstats.un.org/sdgs/report/2024/sdg-progress-by-target/ (consultado el 2 de diciembre de 2024).
- . s.f.b. Progress on Drinking Water (SDG Target 6.1). Sitio web de las Naciones Unidas. www.sdg6data.org/en/indicator/6.1.1 (consultado el 2 de diciembre de 2024).
- . s.f.c. Progress on Sanitation (SDG Target 6.2). Sitio web de las Naciones Unidas. www.sdg6data.org/en/indicator/6.2.1a (consultado el 4 de diciembre de 2024).
- . s.f.d. Progress on Water-Use Efficiency (SDG Target 6.4). Sitio web de las Naciones Unidas. www.sdg6data.org/en/indicator/6.4.1 (consultado el 4 de diciembre de 2024).
- . s.f.e. Progress on International Water Cooperation (SDG Target 6.a). Sitio web de las Naciones Unidas. www.sdg6data.org/en/indicator/6.a.1 (consultado el 2 de diciembre de 2024).
- OMS (Organización Mundial de la Salud). 2022. *Strong Systems and Sound Investments: Evidence on and Key Insights into Accelerating Progress on Sanitation, Drinking-Water and Hygiene*. UN-Water Global Analysis and Assessment of Sanitation and Drinking-Water (GLAAS) 2022 Report. Ginebra, OMS. iris.who.int/handle/10665/365297.
- . 2024. *World Health Statistics 2024: Monitoring Health for the SDGs, Sustainable Development Goals*. Ginebra, OMS. iris.who.int/handle/10665/376869.
- ONU-Habitat/OMS (Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos/Organización Mundial de la Salud). 2024. *Progresos en la proporción de los flujos de aguas residuales domésticas e industriales tratadas de manera adecuada: Situación a mitad de período del indicador 6.3.1 de los ODS y necesidades de aceleración, con especial atención al cambio climático, la reutilización de las aguas residuales y la salud*. Nairobi/Ginebra, UN-Habitat/OMS. www.unwater.org/sites/default/files/2025-02/SDG6_Indicator_Report_631_Progress-on-Wastewater-Treatment_2024_SP.pdf.
- PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). 2024a. *Progress on Ambient Water Quality: Mid-Term Status of SDG Indicator 6.3.2 and Acceleration Needs, with a Special Focus on Health*. Nairobi, PNUMA. www.unwater.org/publications/progress-ambient-water-quality-2024-update.
- . 2024b. *Progress on Water-Related Ecosystems: Mid-Term Status of SDG Indicator 6.6.1 and Acceleration Needs with a Special Focus on Biodiversity*. Nairobi, PNUMA. www.unwater.org/publications/progress-water-related-ecosystems-2024-update.
- UNESCO/ONU-Agua (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura/ONU-Agua). 2020. *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020: Agua y cambio climático*. París, UNESCO. unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373611.
- UNICEF/OMS (Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia/Organización Mundial de la Salud). 2023. *Progress on Household Drinking Water, Sanitation and Hygiene 2000–2022: Special Focus on Gender*. Nueva York, UNICEF/OMS. www.who.int/publications/m/item/progress-on-household-drinking-water--sanitation-and-hygiene-2000-2022---special-focus-on-gender.

Capítulo 1

Introducción

WWAP de la UNESCO
Richard Connor y Philippus Wester

Con contribuciones de: James Thornton (Universidad de Berna)

● ● ●
**Los cursos de
agua procedentes
de las montañas
se volverán más
variables, erráticos
e imprevisibles**

Las montañas, a menudo denominadas las “torres de agua” del mundo, desempeñan un papel único y fundamental en el ciclo global del agua. Afectan a la circulación atmosférica, que determina el tiempo y las precipitaciones. Pueden almacenar agua en forma de hielo y nieve durante las estaciones frías, liberándola durante las estaciones más cálidas como una importante fuente de agua dulce para los usuarios aguas abajo.

Estas aguas de montaña son vitales para satisfacer necesidades humanas básicas como el abastecimiento de agua y el saneamiento. Son esenciales para garantizar la seguridad alimentaria y energética (desde la agricultura de regadío hasta la energía hidroeléctrica y la refrigeración de centrales térmicas) a miles de millones de personas que viven en las regiones montañosas y sus alrededores y en las zonas situadas aguas abajo. También apoyan el crecimiento económico a través de diversas industrias que dependen del agua.

Los glaciares alpinos² también almacenan y liberan agua, aunque durante períodos de tiempo más largos. Mientras que los glaciares continentales, especialmente los de la Antártida y Groenlandia, almacenan grandes cantidades de agua dulce en forma de hielo, los glaciares de montaña tienen un impacto mucho más directo en la disponibilidad de recursos de agua dulce para satisfacer las necesidades humanas en un futuro inmediato y próximo.

Los ecosistemas de montaña sanos favorecen la regulación del caudal, la recarga de acuíferos y la retención de sedimentos, entre otros servicios ambientales. Suelen estar formados por especies vegetales, animales y microbianas robustas, pero los ecosistemas son frágiles y vulnerables a los rápidos cambios de la cubierta terrestre y el clima. A través de los procesos de erosión y sedimentación, las regiones montañosas también proporcionan nutrientes esenciales (por ejemplo, minerales) que sustentan los ecosistemas terrestres, estuarinos y costeros, y fertilizan los suelos aguas abajo. Sin embargo, las regiones de montaña no suelen estar consideradas en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), con la excepción de las metas 6.6, 15.1 y 15.4 de los ODS.

El cambio climático está acelerando el derretimiento de los glaciares, reduciendo la capa de nieve, aumentando el deshielo del permafrost y provocando precipitaciones y riesgos naturales más extremos. Los cursos de agua procedentes de las montañas se volverán más variables, erráticos e imprevisibles. Los cambios en el calendario y el volumen de los caudales máximos y mínimos, el aumento de la erosión y de la carga de sedimentos afectarán a los recursos hídricos aguas abajo en términos de cantidad, disponibilidad y calidad (Alder et al., 2022). Muchas estrategias de adaptación al cambio climático en las montañas están relacionadas fundamentalmente con el agua. Sin embargo, aunque las regiones montañosas se están calentando más rápidamente que las tierras bajas, el ritmo, la eficacia y el alcance actuales de las medidas de adaptación (en su mayoría incrementales) en las regiones montañosas son insuficientes para hacer frente a los futuros riesgos para la seguridad hídrica mundial.

La contaminación y el deterioro de la calidad del agua aguas arriba afectan invariablemente a los usuarios aguas abajo. Aunque se sabe poco sobre las tendencias de la calidad del agua en las regiones montañosas, cada vez hay más pruebas del aumento de la producción de sedimentos en las zonas de alta montaña como consecuencia de los cambios en el uso del suelo (por ejemplo, la deforestación), el cambio climático y la degradación de la criosfera (Li et al., 2021).

² Los glaciares alpinos son glaciares confinados por el terreno montañoso circundante; también se denominan glaciares de montaña.

La ya elevada dependencia de las poblaciones de las tierras bajas de los recursos hídricos de montaña aumentará aún más a mediados de siglo, impulsada principalmente por el desarrollo socioeconómico. Esto pone de relieve la urgencia de mejorar la gobernanza de las aguas de montaña mediante la gestión integrada de las cuencas fluviales, la financiación, la creación de conocimientos y el desarrollo de capacidades, con el fin de satisfacer la creciente demanda mundial de agua.

En ediciones anteriores del *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos* solo se prestó una atención limitada a la criosfera³ –incluidos los glaciares, la dinámica de la capa de nieve y el permafrost– o a los sistemas alpinos, ambos estrechamente relacionados. En consonancia con la designación de 2025 como Año Internacional de la Conservación de los Glaciares (Asamblea General de las Naciones Unidas, 2022a) y con la resolución de 2022 sobre el desarrollo sostenible de las montañas (Asamblea General de las Naciones Unidas, 2022b), este informe tiene por objeto llamar la atención mundial sobre la importancia de las aguas de montaña, incluidos los glaciares alpinos, para el desarrollo sostenible de las regiones montañosas y las sociedades que dependen de ellas, centrándose en los impactos de los rápidos cambios que está experimentando la criosfera de montaña.

Por ello, este informe examina:

- la dinámica de las montañas y los glaciares alpinos, y su papel en el ciclo global del agua como torres de agua, desde una perspectiva de gestión de recursos, con implicaciones en el suministro, almacenamiento y calidad del agua;
- los servicios y beneficios que proporcionan las aguas de montaña en apoyo de las sociedades, las economías y el medio ambiente, destacando los retos para los usuarios (por ejemplo, los asentamientos humanos, la agricultura y la industria) y las oportunidades (beneficios potenciales) en términos de abastecimiento de agua y saneamiento, mitigación del cambio climático y adaptación al mismo, seguridad alimentaria y energética, y protección, restauración y mantenimiento de los ecosistemas.

El informe también trata de cultivar una visión desde la perspectiva de las cuencas, abarcando la gestión integrada de los recursos hídricos, desde el manantial hasta el mar, la cooperación transfronteriza y otros conceptos interrelacionados similares. Sin embargo, se concentra principalmente en los retos aguas arriba y las intervenciones relacionadas, con especial énfasis en los glaciares, la criosfera y los sistemas alpinos, haciendo hincapié en las últimas métricas globales clave y los conocimientos más avanzados.

1.1 Zonas montañosas del mundo

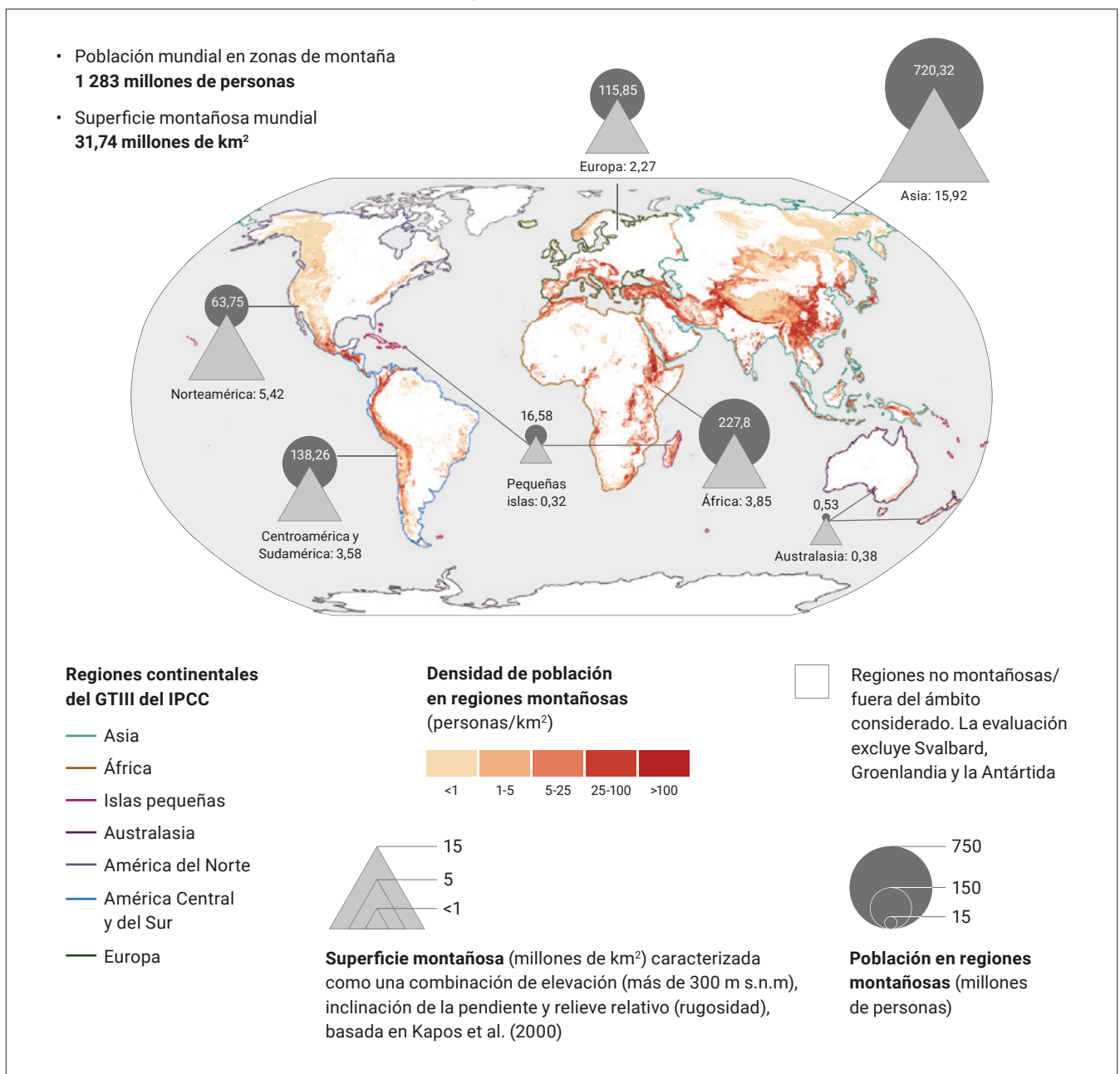
Desde finales de la década de 1990 se han elaborado varias delimitaciones de las regiones montañosas del mundo, basadas en modelos digitales de elevación (Thornton et al., 2022), que culminaron con la del Centro Mundial de Vigilancia de la Conservación del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente en 2000 (cuadro 1.1; Kapos et al., 2000). Ahora sirve de base para la elaboración de informes en el marco de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.

³ La parte de la superficie terrestre cubierta por agua en estado sólido, incluidos los glaciares, los casquetes polares, la nieve, el suelo permanentemente congelado (permafrost), el hielo de lagos y ríos, las capas de hielo y el hielo marino. La criosfera es un componente importante de la hidrosfera y del ciclo global del agua.

Según la delimitación del Centro Mundial de Vigilancia de la Conservación, las regiones montañosas abarcan unos 33 millones de km², es decir, el 24 % de la superficie terrestre mundial, excluida la Antártida (Romeo et al., 2020). En 2015, unos 1 100 millones de personas (alrededor del 15 % de la población mundial) residían en regiones montañosas (figura 1.1); es decir, casi el doble de los poco más de 575 millones de 1975 (Thornton et al., 2022). A título comparativo, en 2020 unos 900 millones de personas vivían en deltas y regiones costeras bajas, incluidas islas (Glavovic et al., 2022).

En 2017, la mayor parte de la población mundial de montaña (alrededor del 91 %) vivía en países en desarrollo. Cerca del 90 % de la población total de montaña vivía a altitudes comprendidas entre 1 500 y 2 500 m sobre el nivel del mar (m s.n.m.), y tan solo unos 75 millones de personas vivían a más de 2 500 m s.n.m. (Tremblay y Ainslie, 2021).

Figura 1.1 Delimitación de las regiones de montaña y densidad de población, 2015



Nota: IPCC WGII: Grupo de Trabajo II del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático; m s.n.m.: metros sobre el nivel del mar.

Fuente: Adler et al. (2022, fig. CCP5.1(a), p. 2278).

Cuadro 1.1 Delimitación de las regiones de montaña

Para delimitar las regiones montañosas, se utiliza una combinación de características del terreno: elevación, inclinación de la pendiente y relieve relativo (rugosidad), también denominado 'rango de elevación local' (la diferencia entre la elevación mínima y máxima en una celda de la cuadrícula).

El Centro Mundial de Vigilancia de la Conservación del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) utiliza rangos de elevación para delimitar las zonas de montaña, considerando montañosas todas las tierras situadas por encima de los 2 500 m sobre el nivel del mar (m s.n.m.), independientemente de su rugosidad. Los terrenos situados entre 300 y 2 500 m s.n.m. se consideran montañosos si los valores de pendiente o rugosidad superan unos umbrales predefinidos: entre 300 y 1 000 m de altitud, un rango de elevación local de más de 300 m en una cuadrícula de 7 km de radio; entre 1 000 y 1 500 m de altitud, más de 5° de pendiente o más de 300 m de rango de elevación local (7 km de radio); y entre 1 500 y 2 500 m de altitud, más de 2° de pendiente. Se ha demostrado que estos umbrales son adecuados para excluir las mesetas de altitud media e incluyen zonas de menor altitud generalmente consideradas montañosas, como las Tierras Altas de Escocia (Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte), el Macizo Central (Francia) y las montañas bajas de las islas del Caribe, así como las colinas y los promontorios accidentados de más de 300 m s.n.m. (Kapos et al., 2000).

1.2 Uso y dependencia de las aguas de las montañas

● ● ●
*Las montañas
suministran entre
el 55 % y el 60 %
de los caudales
anuales de agua
dulce en el mundo*

Como torres de agua del mundo, las montañas son una fuente esencial de agua dulce para la agricultura (de regadío), la generación de energía, la industria y las grandes poblaciones que siguen creciendo, tanto en las montañas como aguas abajo. En general, debido a las mayores precipitaciones y a la menor evaporación, las montañas suministran más escorrentía superficial por unidad de superficie que las tierras bajas, proporcionando entre el 55 % y el 60 % de los caudales anuales de agua dulce en el mundo. Sin embargo, los valores específicos oscilan entre el 40 % y más del 90 % en distintas partes del mundo (Viviroli et al., 2020). La figura 1.2 ilustra la dependencia de diversas zonas de tierras bajas y poblaciones del agua de las montañas.

Entre los grandes ríos que dependen determinadamente de las fuentes de agua de las montañas (>90 % del caudal medio anual) se encuentran el Amu Darya, el Colorado, el Nilo, el Orange y el Río Negro. Entre los ríos cuyo caudal depende en más de un 70 % de las aguas de montaña figuran el Éufrates, el Indo, el San Francisco, el Senegal y el Tigris (Viviroli et al., 2020).

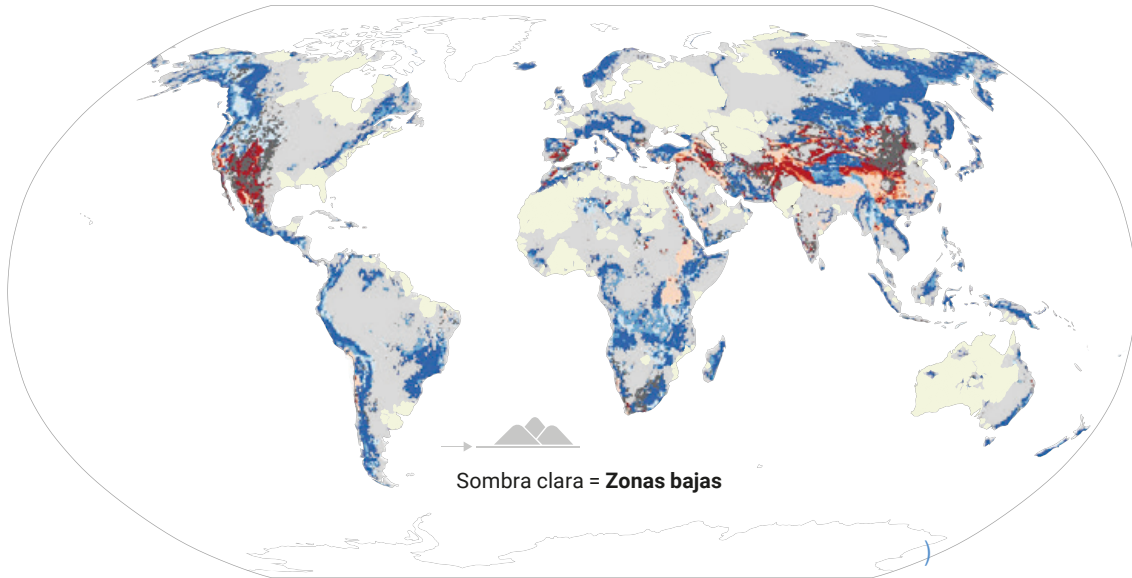
Entre las principales ciudades que dependen de manera significativa de las aguas de montaña se encuentran Adís Abeba, Barcelona, Bogotá, Ciudad de México, Katmandú, La Paz, Lima, Los Ángeles, Melbourne, Nueva Delhi, Nueva York, Quito, Río de Janeiro, Tokio y Yakarta (Kohler et al., 2015).

Las principales actividades económicas de las regiones de montaña son la agricultura, el pastoreo, la silvicultura, el turismo, la minería, el comercio transfronterizo y la producción de energía (véase el capítulo 5). Las montañas proporcionan productos de gran valor, como plantas medicinales, madera y otros productos forestales, ganado de montaña único (por ejemplo, alpacas, cabras, llamas, vicuñas y yaks) y especialidades agrícolas. Son focos mundiales de agrobiodiversidad, ya que en las montañas se conservan gran parte de las reservas genéticas de las plantas de cultivo y medicinales del mundo (véase el capítulo 6).

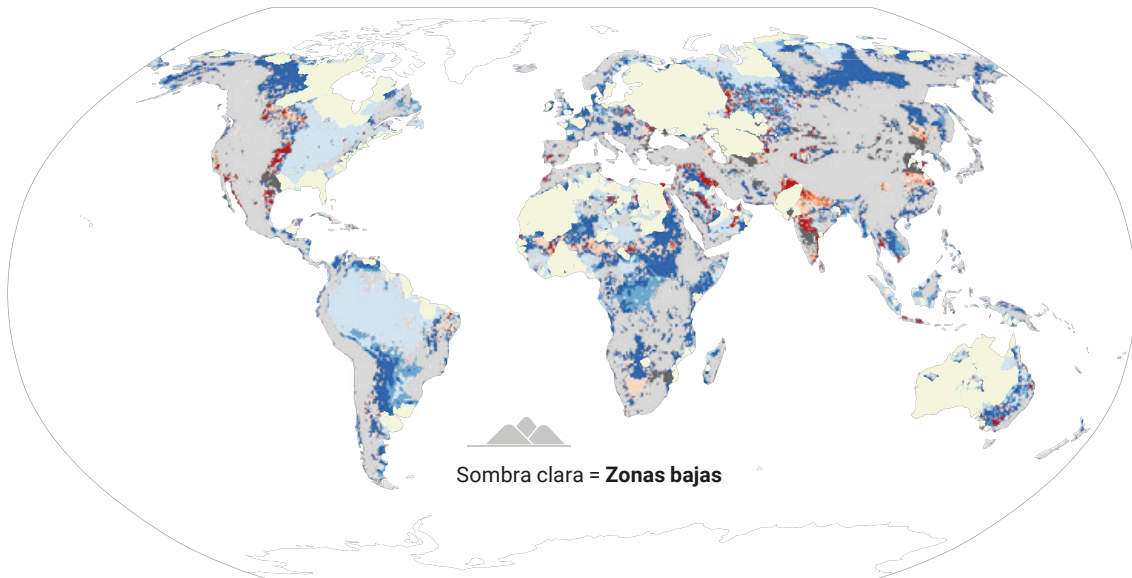
A escala mundial, hasta dos tercios de las actividades de riego podrían depender de las aguas de montaña (véase el capítulo 3), mientras que el número de habitantes de las tierras bajas que dependen en gran medida del agua de las montañas aumentó en todo el mundo, pasando de unos 600 millones en la década de 1960 a unos 1 800 millones en la década de 2000. Otros 1 000 millones de personas que residen en las tierras bajas se benefician de las aportaciones de la escorrentía de las montañas (Viviroli et al., 2020).

Figura 1.2 Predicciones relativas a la importancia de las regiones montañosas y a la dependencia de la población, 2041-2050 (SSP2-RCP6.0)

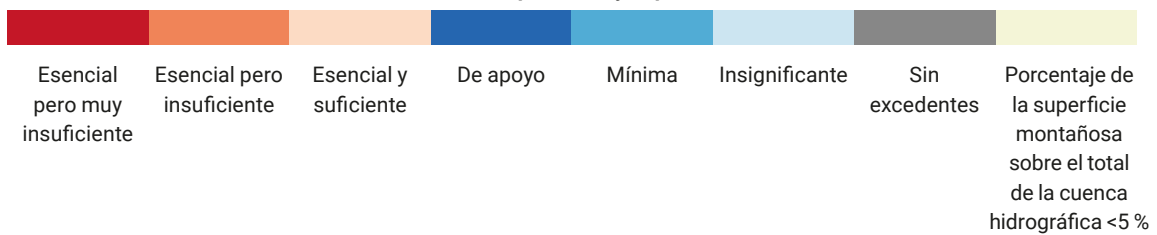
(a) Predicciones relativas a la importancia de las regiones montañosas para los recursos hídricos de las tierras bajas, 2041-2050 (SSP2-RCP6.0)



(b) Predicciones relativas a la dependencia de la población de las tierras bajas de los recursos hídricos de montaña, 2041-2050 (SSP2-RCP6.0)



Nivel de importancia y dependencia



Fuente: Adler et al. (2022, fig. CCP5.2(a, b), p. 2282).

1.3 Poblaciones y comunidades de montaña



La mayoría de los glaciares, incluidos los de montaña, se están derritiendo a un ritmo acelerado en todo el mundo

A nivel mundial, la mayor parte (78 %) de la cubierta terrestre urbana se encuentra fuera de las montañas (es decir, en las tierras bajas). No obstante, la urbanización también es un aspecto importante en las regiones montañosas, ya que una parte sustancial (66 %) de la población mundial de montaña vive en pueblos y ciudades. En 2015, el 34 % de la población mundial de montaña vivía en ciudades de más de 50 000 habitantes (frente al 50 % en las tierras bajas), incluidas capitales como Ciudad de México, Katmandú, La Paz y Quito, el 31 % en ciudades menos pobladas y zonas semidensas (28 % en las tierras bajas), y el 35 % en zonas rurales, definidas como asentamientos con menos de 300 personas/km² (25 % en las tierras bajas; Ehrlich et al., 2021).

La rápida urbanización de las regiones montañosas plantea retos particulares para el desarrollo de los sistemas de abastecimiento de agua y saneamiento (véase el capítulo 4). El aislamiento de las comunidades de montaña, la dificultad de los terrenos y la mayor exposición a los riesgos naturales suelen traducirse en mayores costes de transporte, infraestructuras, bienes y servicios. Estos factores también plantean retos particulares para la financiación, el desarrollo y el mantenimiento de los sistemas de abastecimiento de agua y saneamiento, las redes de drenaje y otras infraestructuras hídricas esenciales. Los datos sobre la proporción de personas con acceso a servicios de agua potable y saneamiento gestionados de forma segura en las regiones de montaña suelen ser escasos o incompletos.

Aunque la mayoría de quienes residen en zonas rurales se dedican a la agricultura o al pastoreo, la seguridad alimentaria y nutricional en las regiones de montaña es menor que en las tierras bajas: entre el 35 % y el 40 % de la población de montaña sufre inseguridad alimentaria y la mitad padece hambre crónica (Romeo et al., 2020). El aislamiento, la inaccesibilidad, la distancia de las carreteras y los mercados de alimentos, las estaciones de crecimiento más cortas, la gran variabilidad de la disponibilidad de agua y las parcelas fragmentadas y pequeñas pueden contribuir a las deficiencias en la producción local de alimentos.

1.4 Criosfera de montaña, incluidos los glaciares

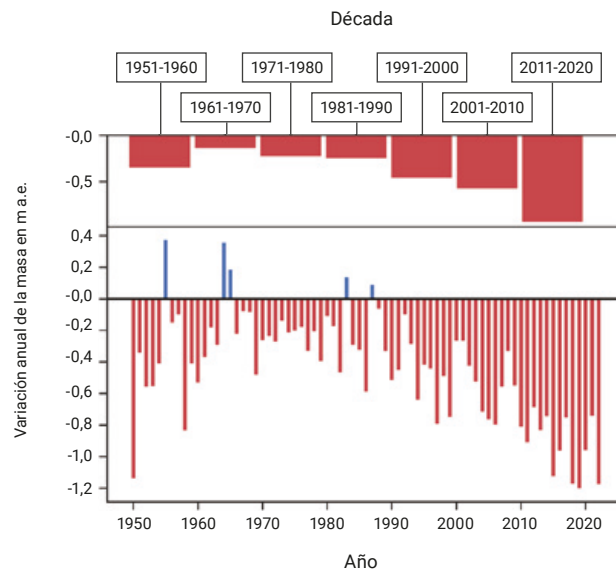
La criosfera de montaña es uno de los componentes del sistema terrestre más sensibles al cambio climático global (véase el capítulo 2). Está experimentando cambios rápidos y en gran medida irreversibles debido a un calentamiento pronunciado. En varios lugares, las elevaciones más altas parecen calentarse más deprisa que las bajas, y los impactos son cada vez más evidentes (Pepin et al., 2022). La mayoría de los glaciares, incluidos los de montaña, se están derritiendo a un ritmo acelerado en todo el mundo (figura 1.3). Combinado con la aceleración del deshielo del permafrost, la disminución de la capa de nieve y unos patrones de nevadas más erráticos (Hock et al., 2019; Adler et al., 2022), esto tendrá repercusiones significativas e irreversibles en la hidrología local, regional y mundial, incluida la disponibilidad de agua.

En la mayoría de las cuencas fluviales con componente criosférico, la fusión de la nieve alimenta más la escorrentía y suele ser considerablemente mayor que la fusión de los glaciares. La capa de nieve ha disminuido en casi todas las regiones montañosas, especialmente en primavera y verano, y se espera que siga disminuyendo en las próximas décadas. La magnitud y el momento del derretimiento de la nieve ya han cambiado considerablemente, y las tendencias en la masa equivalente de agua contenida en la nieve han sido predominantemente negativas en todo el mundo en las últimas décadas (Hock et al., 2019).

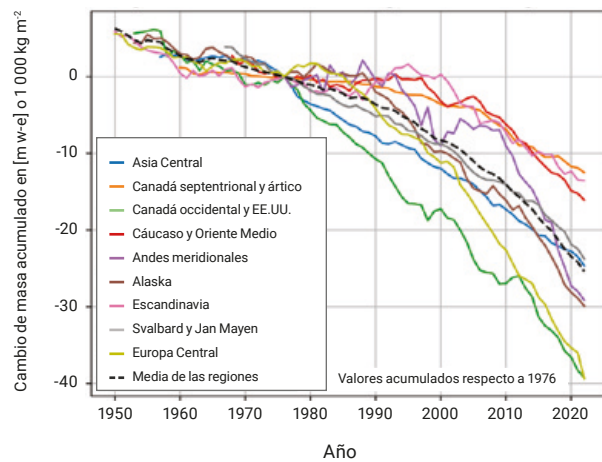
Figura 1.3

Cambios en la masa de los glaciares de todo el mundo, 1950-2020

Nota: Arriba cambios de masa anuales y decenales de los glaciares de referencia con más de 30 años de mediciones glaciológicas en curso. Abajo cambio de masa acumulada en comparación con 1976 para las medias regional y mundial basadas en los datos de los glaciares de referencia. Los valores anuales de cambio de masa se indican en el eje y en unidades de metros de agua equivalente (m a.e.), que corresponden a toneladas por metro cuadrado (1 000 kg/m²) y se calculan como medias aritméticas de medias regionales.



Cambio de masa acumulada regional de los glaciares de referencia



Fuente: OMM (2023, fig. 14, p. 18, a partir de datos del WGMS (2021)).

Se espera que los peligros en las zonas de montaña, como inundaciones repentinas, flujos de escombros, inundaciones por desbordamiento repentino de lagos glaciares, deslizamientos de tierra y avalanchas, así como los riesgos resultantes para las sociedades, aumenten debido al cambio climático, causando graves daños y perturbaciones a las personas, las comunidades y la infraestructura (Adler et al., 2022).

Referencias

- Adler, C., Wester, P., Bhatt, I., Huggel, C., Insarov, G., Morecroft, M., Muccione, V. y Prakash, A. 2022. Mountains. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem y B. Rama (eds), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribución del Grupo de Trabajo II al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge, Reino Unido/Nueva York, Cambridge University Press, pp. 2273-2318. doi.org/10.1017/9781009325844.022.
- Asamblea General de las Naciones Unidas. 2022a. *Año Internacional de la Conservación de los Glaciares (2025)*. Resolución aprobada por la Asamblea General el 14 de diciembre de 2022. Septuagésimo séptimo período de sesiones, A/RES/77/158. digitallibrary.un.org/record/3998543?v=pdf.
- . 2022b. *Desarrollo sostenible de las montañas*. Resolución aprobada por la Asamblea General el 14 de diciembre de 2022. Septuagésimo séptimo período de sesiones, A/RES/77/172. digitallibrary.un.org/record/3998611?v=pdf.
- Ehrlich, D., Melchiorri, M. y Capitani, C. 2021. Population trends and urbanisation in mountain ranges of the world. *Land*, Vol. 10, No. 3, Artículo 255. doi.org/10.3390/land10030255.
- Glavovic, B. C., Dawson, R., Chow, W., Garschagen, M., Haasnoot, M., Singh, C. y Thomas, A. 2022. Cities and settlements by the sea. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem y B. Rama (eds), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribución del Grupo de Trabajo II al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge, Reino Unido/Nueva York, Cambridge University Press, pp. 2163-2194. doi.org/10.1017/9781009325844.019.
- Hock, R., Rasul, G., Adler, C., Cáceres, B., Gruber, S., Hirabayashi, Y., Jackson, M., Kääh, A., Kang, S., Kutuzov, S., Milner, A., Molau, U., Morin, S., Orlove, B. y Steltzer, H. 2019. High mountain areas. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama y N. M. Weyer (eds), *Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Reino Unido/Nueva York, Cambridge University Press, pp. 131-202. doi.org/10.1017/9781009157964.004.
- Kapos, V., Rhind, J., Edwards, M., Price, M. y Ravilious, C. 2000. Developing a map of the world's mountain forests. M. Price y N. Butt (eds), *Forests in Sustainable Mountain Development: A State of Knowledge Report for 2000*. International Union of Forest Research Organizations (IUFRO) Research Series 5. Wallingford, Reino Unido, CABI Publishing, pp. 4-19. doi.org/10.1017/9780851994468.0004.
- Kohler, T., Balsiger, J., Rudaz, G., Debarbieux, B., Pratt, D. J. y Maselli, D. (eds). 2015. *Green Economy and Institutions for Sustainable Mountain Development: From Rio 1992 to Rio 2012 and Beyond*. Berna, Centro para el Desarrollo y el Medio Ambiente/Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE)/Universidad de Ginebra/Geographica Bernensia. boris.unibe.ch/17634/1/Final_Version_Green_Economy_2015%282%29.pdf.
- Li, D., Lu, X., Overeem, I., Walling, D. E., Syvitski, J., Kettner, A. J., Bookhagen, B., Zhou, Y. y Zhang, T. 2021. Exceptional increases in fluvial sediment fluxes in a warmer and wetter High Mountain Asia. *Science*, Vol. 374, No. 6567, pp. 599-603. doi.org/10.1126/science.abi9649.
- OMM (Organización Meteorológica Mundial). 2023. *The Global Climate 2011-2020: A Decade of Accelerating Climate Change*. WMO-No. 1338. Ginebra, OMM. library.wmo.int/records/item/68585-the-global-climate-2011-2020.
- Pepin, N. C., Arnone, E., Gobiet, A., Haslinger, K., Kotlarski, S., Notarnicola, C., Palazzi, E., Seibert, P., Serafin, S., Schöner, W., Terzago, S., Thornton, J. M., Vuille, M. y Adler, C. 2022. Climate changes and their elevational patterns in the mountains of the world. *Reviews of Geophysics*, Vol. 60, Artículo e2020RG000730. doi.org/10.1029/2020RG000730.
- Romeo, R., Grita, F., Parisi, G. y Russo, L. 2020. *Vulnerability of Mountain Peoples to Food Insecurity: Updated Data and Analysis of Drivers*. Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)/Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CLD). doi.org/10.4060/cb2409en.
- Thornton, J. M., Snethlage, M. A., Sayre, R., Urbach, D. R., Viviroli, D., Ehrlich, D., Muccione, V., Wester, P., Insarov, G. y Adler, C. 2022. Human populations in the world's mountains: Spatio-temporal patterns and potential controls. *PLoS ONE*, Vol. 17, No. 7, Artículo e0271466. doi.org/10.1371/journal.pone.0271466.
- Tremblay, J. C. y Ainslie, P. N. 2021. Global and country-level estimates of human population at high altitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, Vol. 118, No. 18, Artículo e2102463118. doi.org/10.1073/pnas.2102463118.
- Viviroli, D., Kummu, M., Meybeck, M., Kallio, M. y Wada, Y. 2020. Increasing dependence of lowland populations on mountain water resources. *Nature Sustainability*, Vol. 3, pp. 917-928. doi.org/10.1038/s41893-020-0559-9.
- WGMS (Servicio Mundial de Vigilancia de los Glaciares). 2021. *Global Glacier Change Bulletin No. 4 (2018–2019)*. Zúrich, Suiza, WGMS. wgms.ch/downloads/WGMS_GGCB_04.pdf.

Capítulo 2

Cambios en la criosfera e impactos en el agua

UNESCO-PHI* y OMM*

Zoë Johnson, Chris DeBeer, Corinne Schuster-Wallace y John Pomeroy¹, James Thornton², Sonam Wangchuk³, James McPhee^{4,5}, Dhiraj Pradhananga⁶, Kerry Black y Fred Wrona⁷

Con contribuciones de: Anil Mishra y Abou Amani (UNESCO-PHI), Nilay Dogulu (OMM), Tomasz Kolerski (Universidad de Tecnología de Gdansk) y Prashant Baral (ICIMOD)

*UNESCO-PHI y OMM coordinaron el desarrollo del capítulo con la participación de:

¹ Universidad de Saskatchewan, ² Universidad de Berna, ³ ICIMOD, ⁴ Universidad de Chile, ⁵ Asociación Internacional de Ciencias Hidrológicas, ⁶ Universidad Tribhuvan y ⁷ Universidad de Calgary

● ● ●
Las altas montañas reciben más precipitaciones que las zonas más bajas; además, contribuyen de manera significativa a la escorrentía y a la generación de caudales

Las regiones montañosas abarcan una amplia gama de elevaciones. En este capítulo, se definen como “altas montañas” aquellas donde la nieve y el hielo desempeñan un papel importante en el abastecimiento global de agua dulce (Viviroli et al., 2020; IPCC, 2023) y en el ciclo hidrológico local o regional. Si bien ambos están relacionados, el hidroclima, a diferencia de la altitud, constituye una categoría de referencia más relevante para comprender los cambios inminentes en la criosfera montañosa y sus consecuencias para el agua. A menudo llamadas “torres de agua”, las altas montañas reciben más precipitaciones que las zonas más bajas; además, contribuyen de manera significativa a la escorrentía y a la generación de caudales (Immerzeel et al., 2020; Viviroli et al., 2020). Gran parte de estas precipitaciones se produce en forma de nieve, que se almacena en mantos de nieve estacionales y hielo durante los períodos fríos y luego se libera como agua de deshielo durante los períodos más cálidos.

Se suele afirmar que alrededor de 2 000 millones de personas dependen de las montañas —y, por lo tanto, de las aportaciones del deshielo de la criosfera— para su abastecimiento de agua dulce. Esta cifra se deriva de la estimación de que 2 000 millones de personas viven en cuencas hidrográficas que se originan en las montañas (Immerzeel et al., 2020; Viviroli et al., 2020). Sin embargo, la importancia y las contribuciones del derretimiento de la nieve, el hielo y el suelo congelado a la disponibilidad y calidad de los recursos hídricos aguas abajo a menudo se comprenden mal y se caracterizan erróneamente (Gascoin, 2024). Generalizaciones como “Solo los glaciares del Himalaya proporcionan agua a 1400 millones de personas” (Milner et al., 2017, p. 9771) o “Los glaciares son fuentes cruciales de vida en la Tierra, ya que proporcionan recursos hídricos vitales a la mitad de la humanidad para uso doméstico, agricultura y energía hidroeléctrica” (UNESCO/UICN, 2022, p. 3) pueden dejar la impresión inexacta de que, sin glaciares, miles de millones de personas se quedarán sin agua (Gascoin, 2024).

Los glaciares desempeñan un papel importante en el abastecimiento de agua dulce, pero lo hacen con muchos más matices y variaciones regionales de lo que sugieren las afirmaciones anteriores. Es preciso reconocer que muchos otros procesos hidroclimáticos también influyen en los sistemas de agua dulce. De hecho, en la mayoría de las zonas de alta montaña, la capa de nieve estacional, y no los glaciares, es la principal fuente de escorrentía (Barnett et al., 2005). El cambio climático está afectando radicalmente a todos los componentes de la criosfera montañosa. Por lo tanto, es necesario examinar y abordar explícitamente la complejidad de dichos impactos.

Este capítulo describe la importancia de las altas montañas desde el punto de vista hidrológico y cómo está cambiando la criosfera montañosa. El calentamiento global se intensifica en la mayoría de las elevaciones y está reduciendo la acumulación y la duración de la capa de nieve, acelerando la pérdida y el retroceso de la masa glaciar, provocando el deshielo del permafrost (suelo permanentemente congelado) y adelantando el momento y, en ocasiones, la velocidad del derretimiento de la nieve y el hielo, con una alta variabilidad espacial y temporal (Pepin et al., 2022; IPCC, 2023). El momento del deshielo en la estación cálida, que antes era predecible, está siendo reemplazado por regímenes de escorrentía más variables, dominados por las precipitaciones, con complejos efectos aguas abajo. A continuación, se analizan los posibles impactos de estos cambios en los sistemas de agua dulce y la ocurrencia de fenómenos extremos (como sequías, inundaciones, deslizamientos de tierra, etc.), junto con sus implicaciones para los ecosistemas y las comunidades ubicadas aguas abajo.

2.1 Dinámica de la criosfera de montaña

2.1.1 Procesos hidrológicos de alta montaña

Las montañas forman las cabeceras de numerosos ríos en todo el mundo y, por lo tanto, desempeñan un papel fundamental en el ciclo hidrológico global (figura 2.1). El derretimiento cíclico de la capa de nieve y los glaciares de las montañas durante la estación cálida libera agua dulce, que puede fluir directamente a arroyos y ríos o filtrarse al suelo, reponiendo la humedad del suelo y las aguas subterráneas.

Figura 2.1 Procesos hidrológicos y criosféricos de alta montaña que regulan el suministro de agua



Fuente: adaptado de Bertonecini (2024, fig. 1.1, p. 5).

En muchas regiones de alta montaña, la formación de la capa de nieve estacional proporciona la mayor parte de las reservas de agua dulce. Esto se conoce como “equivalente en agua de la nieve” (EAN), la cantidad de agua que produciría un volumen determinado de manto nivoso si se derritiera (Barnett et al., 2005). Como se muestra en la figura 2.1, el manto nivoso de montaña puede redistribuirse por el viento a través de la nieve en suspensión (Pomeroy y Li, 2000), por la gravedad mediante avalanchas de nieve (Bernhardt y Schultz, 2010) y por los bosques mediante intercepción (Hedstrom y Pomeroy, 1998). La topografía de las montañas facilita la deposición de la nieve en las laderas a sotavento (Lehning et al., 2008). La nieve soplada y la nieve interceptada están sujetas a altas pérdidas por sublimación⁴, que pueden reducir el EAN de montaña hasta a la mitad (Essery y Pomeroy, 2004; Pomeroy et al., 2022). El deshielo se produce preferentemente en laderas soleadas, es más rápido durante las lluvias cálidas y más lento bajo el dosel forestal. Por lo tanto, la orientación de las laderas y la cobertura forestal controlan en gran medida el pico y la duración de los hidrogramas de caudal de deshielo (Marks et al., 1998; Ellis et al., 2013). La distribución del agua de deshielo entre infiltración y escorrentía depende de la velocidad de deshielo, la textura del suelo, la saturación y la presencia de suelo congelado estacional o permanentemente. Los terrenos congelados reducen la permeabilidad del suelo; su incidencia disminuye con el calentamiento global y el aumento de la duración de la temporada sin nieve.

⁴ Conversión directa del agua de su forma sólida (nieve o hielo) a su forma gaseosa (vapor de agua), sin fundirse primero en agua líquida (USGS, 2019).

● ● ●
En la mayoría de las zonas de alta montaña, la capa de nieve estacional, y no los glaciares, es la principal fuente de escorrentía

Los procesos de redistribución de la nieve hacen que los volúmenes de nieve derretida sean muy sensibles a los cambios en la vegetación. La expansión de los arbustos de la tundra puede reducir la redistribución y sublimación de la nieve, aumentando así el EAN. Por el contrario, la forestación aumenta las pérdidas por sublimación, reduciendo así el EAN. El deshielo de la nieve es especialmente sensible al cambio climático, ya que puede aumentar o reducir las precipitaciones en las montañas y aumentar la temperatura y la humedad del aire, disminuyendo así la fracción de precipitación que cae en forma de nieve, adelantando el momento del deshielo, provocando cambios en los eventos de derretimiento de la lluvia sobre nieve (ROS, por sus siglas en inglés) y acelerando o desacelerando las tasas de fusión de la nieve. Dichas tasas generalmente disminuyen con el crecimiento de la vegetación.

Si las condiciones climáticas lo permiten, no toda la nieve se derrite. Si persiste durante muchos años, los mantos de nieve perennes pueden convertirse en glaciares (DeBeer et al., 2020). La acumulación estacional de nieve y su compresión gradual hasta formar *firn*⁵ y luego el hielo aumenta la masa de un glaciar, mientras que la ablación⁶ en la estación cálida lo disminuirá. El balance de masa glaciar es la diferencia neta entre la acumulación de nieve y la ablación de nieve y hielo. La ablación por fusión y sublimación se ve fuertemente afectada por la duración de la capa de nieve, la radiación neta y la temperatura. Estos factores se ven afectados por la temperatura del aire, la nubosidad, el albedo de la superficie del hielo, las nevadas invernales y la redistribución de la nieve, y por lo tanto son sensibles al cambio climático.

El polvo, los depósitos de hollín relacionados con la combustión, incluido el carbono negro, y la proliferación microbiana y algal en la nieve y en las superficies de los glaciares son cada vez más comunes debido a la mayor frecuencia o intensidad de las tormentas de polvo, la contaminación atmosférica y los incendios forestales (cuadro 2.1). Estos factores pueden acelerar el ritmo del derretimiento al disminuir el albedo de la superficie hasta la siguiente nevada (Aubry-Wake et al., 2022). Sin embargo, si una capa de escombros rocosos es lo suficientemente gruesa, una masa de hielo puede aislarse del calentamiento externo y persistir mucho después de que el resto del glaciar se retire (Miles et al., 2020).

Los entornos montañosos glacializados presentan una hidrología compleja. La presencia de glaciares aumenta la acumulación de nieve y los vientos fríos de drenaje, reduce la temperatura de los arroyos y retrasa la generación de caudales. Las vías subglaciales guían el agua de deshielo a través de diversos terrenos, como lechos rocosos y morrenas, y recargan las aguas subterráneas, aunque estos procesos suelen ser poco conocidos (Müller et al., 2022). La figura 2.2 resume algunos de los cambios previstos en los entornos de alta montaña debido al calentamiento atmosférico.

2.1.2 Tendencias en la criosfera de montaña

La evidencia del calentamiento atmosférico desde principios del siglo XX está presente en todas las cadenas montañosas. Los efectos se amplifican a mayor altitud en ciertas regiones (Iniciativa para el Estudio de las Montañas — Grupo de trabajo EDW, 2015; Hock et al., 2019a; Pepin et al., 2022). La altitud a la que la lluvia se transforma en nieve está aumentando debido al calentamiento. Por lo tanto, las elevaciones más bajas y los climas más cálidos experimentan mayores disminuciones en la profundidad y la duración de la capa de nieve, mientras que las elevaciones más frías y altas pueden experimentar un aumento del pico del EAN a medida que las precipitaciones aumentan y las pérdidas por sublimación disminuyen con el cambio climático (López-Moreno et al., 2020).

⁵ Una etapa intermedia en la transformación de la nieve en hielo glacial (USGS, 2013).

⁶ La pérdida de nieve y hielo de un glaciar (por ejemplo, por derretimiento, evaporación, sublimación o desprendimiento; USGS, 2013).

Cuadro 2.1 Impacto de la deposición de carbono negro, polvo y otras partículas en el derretimiento de la nieve y el hielo

Con el calentamiento global, las regiones montañosas reciben emisiones de un número creciente de incendios forestales y tormentas de polvo. Junto con las actividades humanas, esto provoca una creciente deposición de carbono negro y otras partículas en la superficie de los glaciares y los mantos de nieve perenne. Estas partículas pueden transportarse a grandes distancias, incluso de un continente a otro. Las impurezas oscurecen las superficies de nieve y hielo, lo que provoca una mayor absorción de la radiación solar. Además, pueden favorecer la proliferación microbiana, que oscurece aún más la superficie y retiene las impurezas durante largos períodos. Esto puede influir significativamente en el balance energético de la superficie, aumentando así las tasas de fusión, especialmente durante los períodos y en lugares de alta radiación solar entrante. Este se reconoce cada vez más como un factor importante e influyente (Zhang et al., 2021; Bertoncini et al., 2022).

Existen complejidades y procesos interactivos que hacen que los impactos de la deposición de partículas no se limiten simplemente al aumento de las tasas de fusión. La deposición tiende a ser de escala local a regional, con una variabilidad espacial considerable. Los efectos pueden ser efímeros, ya que las nevadas posteriores cubren la superficie anterior y refrescan el albedo, y el derretimiento o la lluvia lava las superficies de hielo. Sin embargo, en algunos lugares, esto puede generar una retroalimentación positiva, donde el deshielo concentra las impurezas, oscurece aún más la superficie y favorece el derretimiento. El humo de los incendios forestales también puede reducir la radiación solar entrante, incluso hasta el punto de causar un enfriamiento de la superficie, contrarrestando el efecto de una reducción del albedo (Aubry-Wake et al., 2022).

La deposición de carbono negro y otras partículas sobre las superficies de nieve y hielo puede tener un gran impacto en el balance energético superficial y el derretimiento. Aún no se comprende bien cómo está cambiando esto, la duración de los efectos, las interacciones de retroalimentación y procesos que se producen, ni su variabilidad a nivel mundial. Por lo tanto, es importante dilucidar este aspecto para predecir la dinámica de los futuros recursos hídricos en las regiones montañosas.



Glaciar Athabasca sin hollín, Canadá, octubre de 1993

Foto: John Pomeroy.



El hollín de los incendios forestales y las algas oscurecen el glaciar Athabasca, agosto de 2019

Foto: John Pomeroy.

Figura 2.2 Principales cambios criosféricos e hidrológicos en las regiones de alta montaña causados por el calentamiento global del siglo XXI



Fuente: autores.

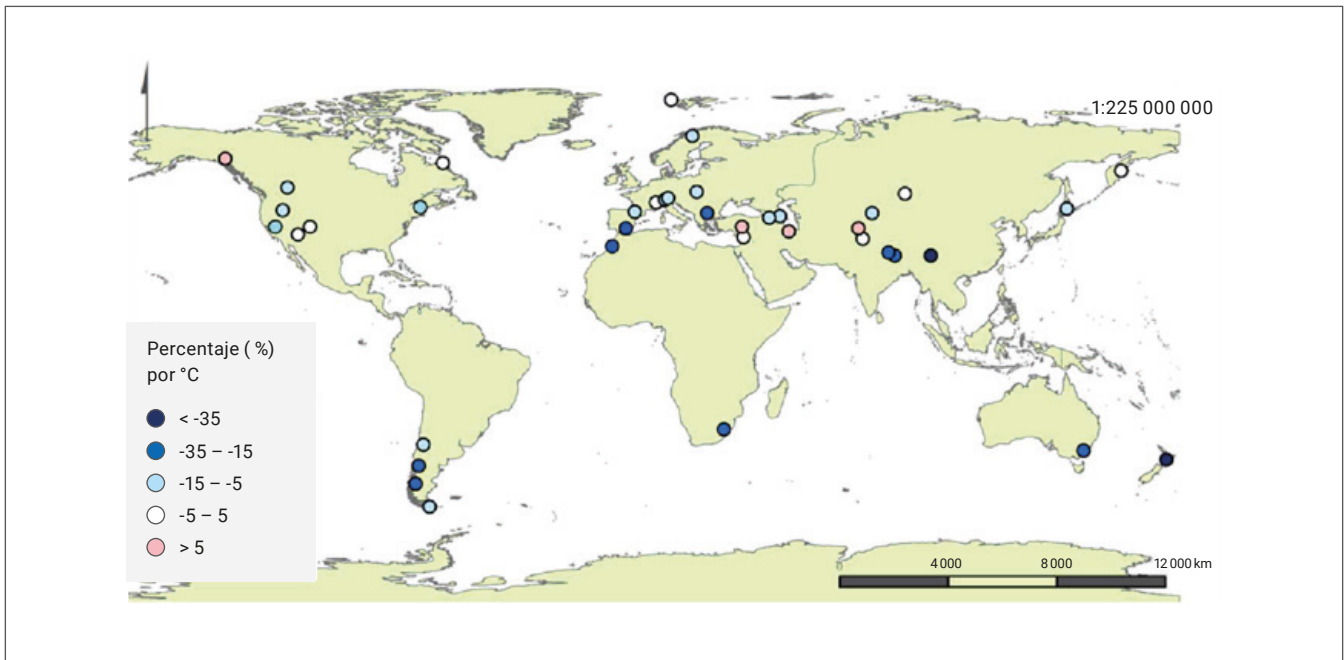
● ● ●
La evidencia del calentamiento atmosférico desde principios del siglo XX está presente en todas las cadenas montañosas

Las tendencias en las cuencas de montaña muestran una mayor proporción de precipitación en forma de lluvia en lugar de nieve, una menor redistribución de la nieve y de la superficie cubierta de nieve, y un deshielo más temprano (figura 2.2). Esto da lugar a una disociación entre el régimen de generación de caudales y el régimen de fusión de la nieve, donde el efecto de “represamiento de la nieve” sobre el frescor primaveral⁷ se reduce rápidamente, dejando que los caudales respondan rápidamente a las precipitaciones invernales y a los eventos de fusión asociados (López-Moreno et al., 2020).

Con el calentamiento, es más rápida la disminución de la nieve acumulada y del pico del EAN que el aumento de las tasas de fusión (Pomeroy et al., 2022). La disminución del EAN con el calentamiento es mayor en laderas soleadas, zonas sin bosques y elevaciones más bajas; de la misma manera, el aumento de las tasas de fusión con el calentamiento es mayor en elevaciones más bajas y en climas más cálidos. Se prevé que los eventos de ROS disminuyan con el calentamiento en la mayoría de las cuencas de alta montaña, con mayores disminuciones en elevaciones más bajas y en climas más cálidos, mientras que se prevén aumentos de ROS en elevaciones más altas y en climas más fríos (figura 2.3; López-Moreno et al., 2021). A medida que avanza el calentamiento climático, la disminución de los mantos nivosos y el deshielo más temprano, además de la mayor frecuencia de eventos de deshielo a mediados del invierno, reducirán el volumen de las crecidas y adelantarán los caudales máximos semanas o meses (López-Moreno et al., 2020).

⁷ Un pico en el caudal del río que surge del deshielo primaveral.

Figura 2.3 Cambio porcentual por 1 °C de calentamiento en la frecuencia de eventos de derretimiento de la lluvia sobre nieve (ROS) en alta montaña en todo el mundo, 1982-2014



Nota: los puntos rosados corresponden a las montañas con el mayor aumento en la frecuencia de eventos de ROS con el calentamiento, y los puntos negros a las con la mayor disminución.

Fuente: López-Moreno et al. (2021, fig. 6, p. 7). Licencia CC BY 4.0.

Las regiones montañosas donde la capa de nieve ya no persiste durante la estación cálida inevitablemente verán desaparecer sus glaciares, ya que la capa de nieve perenne es necesaria para mantener la masa glaciar. El retroceso y la pérdida de glaciares han estado ocurriendo desde el siglo XX en la mayor parte del mundo (DeBeer et al., 2020; IPCC, 2023) y se han acelerado en las últimas décadas (Zemp et al., 2019). La mayoría de los glaciares de montaña del mundo están adelgazándose rápidamente (figura 2.4; Hugonnet et al., 2021) y están desequilibrados con el clima actual. Esto significa que seguirán menguando independientemente de la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (Cook et al., 2023). Un mayor calentamiento atmosférico exacerbará este desequilibrio a nivel mundial; se calcula que, con un calentamiento global de entre 1,5 °C y 4 °C, para 2100 los glaciares de montaña a nivel mundial perderán entre el 26 % y el 41 % de la masa total que tenían en 2015. Un gran número de glaciares individuales desaparecerá por completo, dejando sin hielo muchas cabeceras de montaña actualmente congeladas (Rounce et al., 2023).

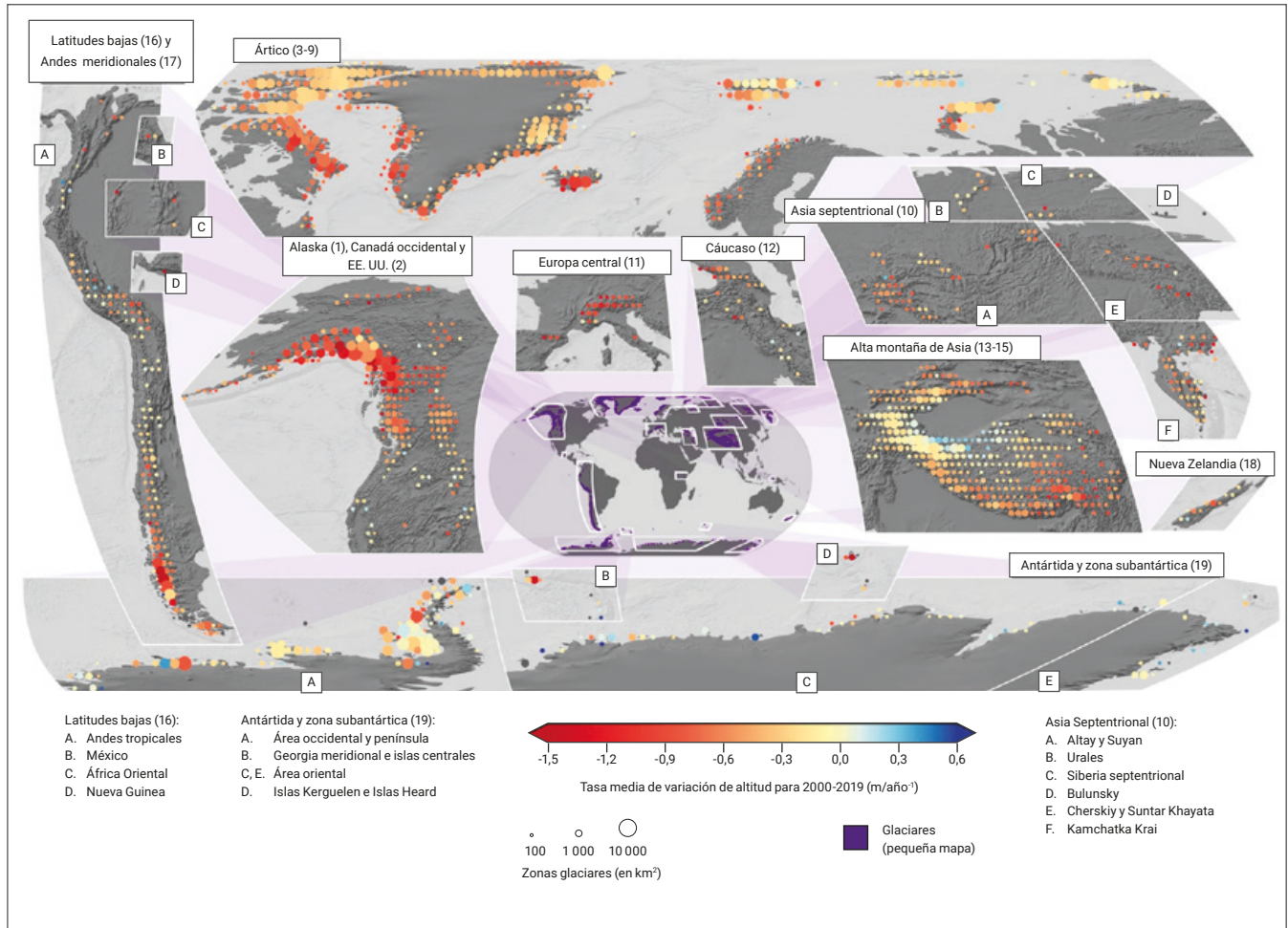
2.2

Impactos de los cambios en las condiciones de la nieve y el hielo en las montañas

2.2.1 Respuestas del agua dulce

Las contribuciones de los diferentes componentes de la criosfera (p. ej., nieve, hielo glacial y permafrost) al suministro de agua dulce varían regional, topográfica, interanual y estacionalmente. Los impactos de los cambios de la criosfera dependerán de cómo los sistemas aguas abajo, tanto humanos como naturales, respondan a las nuevas tendencias de los aspectos relativos al suministro de agua superficial y subterránea, como la cantidad, el momento, la duración y la fiabilidad de la descarga fluvial. La pérdida de sincronización entre la escorrentía de las montañas y la demanda de agua río abajo es una gran preocupación para los usuarios del recurso hídrico. Las regiones donde el uso del agua ha coincidido históricamente con el deshielo de la nieve y de los glaciares en la estación cálida son las más vulnerables al cambio. Es necesario considerar las variaciones locales al diseñar políticas de mitigación y adaptación.

Figura 2.4 Cambios en la elevación de la superficie de los glaciares a nivel mundial, 2000-2019



Nota: en las regiones montañosas de todo el mundo se observa una disminución de la elevación de la superficie de los glaciares y una pérdida de hielo, y solo en unas pocas áreas limitadas se han observado aumentos de hielo.

Fuente: Hugonnet et al. (2021, fig. 2, p. 727). Esta figura se reproduce con permiso de SNCSC; la licencia Attribution-ShareAlike 3.0 IGO (CC BY-SA 3.0 IGO) no se aplica a esta figura.

Las contribuciones del deshielo de los glaciares al suministro de agua disponible varían en términos de importancia. Por ejemplo, Buytaert et al. (2017) constataron que en los Andes tropicales el deshielo de los glaciares contribuía solo con el 2,2 % del agua disponible anualmente en Quito, en el Ecuador, en un año normal. En cambio, más al sur, en La Paz, en el Estado Plurinacional de Bolivia, encontraron que el deshielo de los glaciares contribuía con el 15 % del suministro de agua anual, y en Huaraz, en el Perú, con el 19 %. Por otro lado, en la cuenca del río Bow en el Canadá (hogar de 2 millones de personas), el deshielo de la nieve es mucho más importante que el de los glaciares para el volumen anual del caudal fluvial: de hecho, el deshielo de la nieve genera entre el 60 % y el 80 % del caudal disponible (Fang y Pomeroy, 2023). Siendo un importante factor que contribuye al suministro de agua dulce, los regímenes de nieve en las montañas, y específicamente cómo están cambiando estos regímenes, deberían ser un área de investigación prioritaria.

Aunque a menudo se sobreestima la importancia de los glaciares para el suministro de agua dulce (cuadro 2.2), estos ofrecen otros beneficios importantes para la seguridad hídrica. La amortiguación de las sequías (que se refiere al aumento del derretimiento de los glaciares durante los períodos cálidos y secos, que puede compensar la falta de agua dulce) puede mejorar la resiliencia río abajo en períodos de estrés hídrico. Los glaciares se derriten más rápido durante los períodos más cálidos y secos, por lo que, especialmente una vez agotado el manto nivoso de las montañas, su rápido derretimiento puede desempeñar un papel crucial para mantener el caudal hasta el final del período seco (Hopkinson y Young, 1998).



La amortiguación de la sequía mediante el derretimiento de los glaciares puede ser crucial para sostener la producción agrícola

En las regiones donde la estación seca coincide con la temporada de crecimiento, la amortiguación de la sequía mediante el derretimiento de los glaciares puede ser crucial para sostener la producción agrícola. Buytaert et al. (2017) constataron que, en los Andes tropicales, la superficie máxima mensual de tierras irrigadas que reciben al menos el 25 % del agua del deshielo de los glaciares se duplicó durante los años de sequía. Para las comunidades de alta montaña que dependen del agua derivada de los glaciares para la producción de alimentos u otros fines cruciales, la recesión de los glaciares puede forzar cambios en las prácticas históricas (véase el cuadro 3.4) o aumentar la dependencia de las comunidades de recursos hídricos superficiales y subterráneos cada vez más inciertos. A medida que los glaciares de montaña retroceden y desaparecen, las regiones de alta montaña perderán su valiosa capacidad de amortiguación; además, las regiones aguas abajo podrían sufrir una menor resiliencia a las condiciones secas o de sequía (Fang y Pomeroy, 2023).

La contribución relativa de los glaciares al suministro de agua dulce disminuye con el aumento de la distancia de las zonas aguas abajo de los glaciares mismos. Los ejemplos de la figura 2.5 (Kaser et al., 2010) muestran que el impacto de la hidrología de los glaciares en el caudal fluvial aguas abajo disminuye considerablemente con el aumento de la distancia de los glaciares, y que las contribuciones son insignificantes en la desembocadura del río. Por lo tanto, las comunidades que viven más cerca de los extremos de los glaciares serán las más vulnerables a los impactos de la recesión glaciaria, aunque los beneficios de la resiliencia a la sequía siguen siendo relevantes. Lo mismo ocurre con las comunidades de las zonas río abajo más distantes, aunque no dependan en gran medida de los glaciares para su suministro de agua. Y aunque todavía no se comprenden bien dichos fenómenos, se prevé que las aguas subterráneas de montaña y los impactos del deshielo del permafrost en el flujo base adquieran mayor importancia a medida que desaparecen los glaciares en retroceso (Arenson et al., 2022; van Tiel et al., 2024).

Cuadro 2.2 Precaución contra la aplicación del concepto de “pico hídrico” en las políticas hídricas

El concepto de pico hídrico se utiliza comúnmente para analizar los impactos de la recesión de los glaciares. Sugiere que, a medida que aumentan las tasas de fusión de los glaciares y disminuyen las áreas ocupadas por los mismos con el calentamiento, se producirá un aumento inicial en los volúmenes de descarga glaciaria hasta alcanzar un “pico” debido al aumento de la tasa de fusión, seguido de una disminución causada por la reducción de la cobertura glaciaria (Huss y Hock, 2018; Hock et al., 2019b).

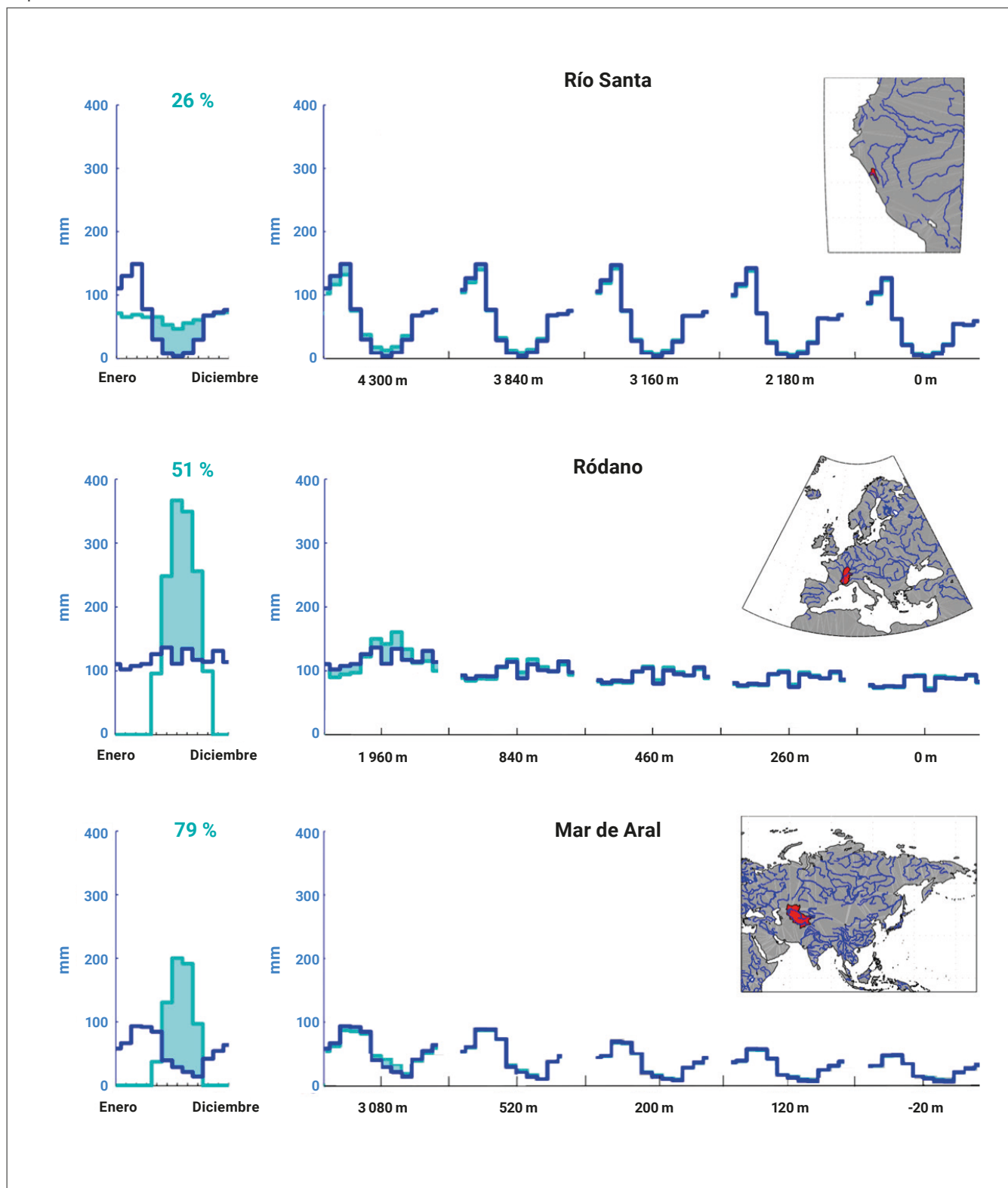
Este es un concepto idealizado que debería aplicarse únicamente a la descarga glaciaria, y que podría no reflejarse en la dinámica general de los caudales de las cabeceras de montaña. La mayoría de los arroyos en cuencas glaciarias no se alimentan únicamente de glaciares, por lo que deben considerarse otros cambios hidrológicos al realizar predicciones relativas al caudal (p. ej., cambios en el régimen de precipitaciones, cambios en el manto nivoso, cambios en la vegetación e interacciones con las aguas subterráneas).

Por ejemplo, se prevé un aumento de las precipitaciones en las montañas en muchas partes del mundo. Es improbable que los caudales fluviales alcancen su pico con el deshielo de los glaciares y luego se reduzcan, ya que en la mayoría de los casos el volumen de los caudales fluviales también se ve influenciado por el deshielo y la escorrentía pluvial. Los glaciares de todo el mundo están retrocediendo; muchas de sus contribuciones estacionales a los caudales han aumentado y en un futuro disminuirán. Para la gestión de los recursos hídricos, la tendencia idealizada del pico del agua se debilita a medida que aumenta el tamaño de la cuenca donde el caudal de salida se encuentra más aguas abajo de los glaciares.

Cabe destacar que, si bien las altas montañas son, en efecto, depósitos de agua, la dependencia de las comunidades río abajo de los glaciares en términos de recursos hídricos suele malinterpretarse (Viviroli et al., 2020). A menudo se afirma que los glaciares son importantes para los recursos hídricos mundiales (por ejemplo, que “solo los glaciares del Himalaya proporcionan agua a 1 400 millones de personas” [Milner et al., 2017, p. 9771]), lo que deja al público con la impresión errónea de que, sin glaciares, la mitad de la humanidad carecería de agua (Gascoin, 2024).

La criosfera de montaña (incluidos los glaciares) desempeña un papel importante en el abastecimiento de agua dulce; sin embargo, la importancia relativa de los glaciares, la nieve y el hielo para los recursos de agua dulce varía considerablemente en el tiempo y el espacio. Los gestores de recursos hídricos y los responsables de la formulación de políticas deben ser cautelosos ante este sensacionalismo con respecto a los glaciares y reconocer si sus contextos locales difieren de los mensajes que se dan a nivel global, y en qué medida.

Figura 2.5 Contribución del derretimiento de los glaciares y las precipitaciones al caudal de los ríos en cuencas importantes con manantiales de montaña



Nota: Izquierda: balance de masa de las áreas glaciadas (nieve + hielo), con acumulación mensual (azul oscuro), ablación mensual (turquesa) y volumen de escorrentía de nieve y hielo derretido del glaciar (sombreado turquesa). Los porcentajes indican la precipitación anual en el glaciar que escurre como agua de deshielo con retraso estacional. Derecha: efecto de la escorrentía de nieve y hielo con retraso estacional en el caudal del río en función de la altitud (eje x), comenzando en el extremo del glaciar y terminando en la desembocadura del río, con precipitación anual (azul oscuro) y nieve y hielo derretido del glaciar (turquesa).

Fuente: adaptado de Kaser et al. (2010, fig. 1, p. 20224). La licencia Attribution-ShareAlike 3.0 IGO (CC BY-SA 3.0 IGO) no se aplica a esta figura. PNAS no es responsable de la exactitud de esta traducción.

● ● ●
*Se prevé que la
desglaciación
tenga importantes
implicaciones
para las redes
alimentarias
acuáticas*

2.2.2 Respuestas ecológicas

Los cambios inducidos por el clima en la criosfera de montaña están alterando los regímenes hidrológicos y la calidad del agua. La nieve y el hielo son hábitats para numerosas especies y constituyen ecosistemas biológicamente activos (Jones et al., 2001). Desempeñan un papel fundamental en el ciclo biogeoquímico del carbono, el nitrógeno y otros elementos (Sharp y Tranter, 2017). En entornos de alta montaña, las respuestas ecológicas previstas a un clima más lluvioso y nevoso incluyen una mayor disponibilidad de agua líquida cerca de la superficie durante todo el año, la colonización de árboles y arbustos en las zonas más elevadas, una mayor movilidad de nutrientes y contaminantes, el crecimiento de algas y otros microorganismos, y una mayor producción de carbono orgánico (Rasouli et al., 2019; Verrall y Pickering, 2020).

Se han observado efectos de retroalimentación entre incendios forestales, tormentas de polvo y crecimiento de algas glaciares con nutrientes en los depósitos de carbono, lo que crea hábitats fértiles para algas que pueden acelerar el derretimiento al disminuir el albedo de los glaciares y la nieve (Williamson et al., 2019; Aubry-Wake et al., 2022). La calidad del agua en las regiones montañosas también es preocupante. Algunos estudios sugieren que la degradación del permafrost en regiones montañosas con lechos rocosos sulfurosos subyacentes puede facilitar la oxidación previamente inhibida de minerales sulfurosos, aumentando así las concentraciones de metales pesados en las reservas de agua subterránea (Ilyashuk et al., 2018; véase el capítulo 6).

Los impactos hidroecológicos se extienden aguas abajo hacia entornos ribereños, lacustres y marinos costeros. Estos impactos incluyen cambios en los regímenes sedimentarios y térmicos, cambios en los flujos biogeoquímicos y de contaminantes, cambios en la disponibilidad y calidad del hábitat, y modificaciones en los patrones de biodiversidad de las especies (Milner et al., 2017; Somers y McKenzie, 2020). Vanderwall et al. (2024) descubrieron que los lagos alimentados por los glaciares poseen características biogeoquímicas distintas a las de los lagos de montaña alimentados por la nieve. Se prevé que la desglaciación tenga importantes implicaciones para las redes alimentarias acuáticas; los impactos más significativos son los que se producen en lagos y arroyos alimentados por glaciares.

Los glaciares desempeñan un importante papel termorregulador en los hábitats marinos de agua dulce y cercanos a la costa. El agua de deshielo y las aguas subterráneas que emanan de los glaciares rocosos contribuyen a mantener temperaturas bajas y constantes, que son esenciales para algunas especies de peces (Harrington et al., 2017; Somers y McKenzie, 2020). Se ha comprobado que las alteraciones en la escorrentía glaciar de montaña y los regímenes de temperatura tienen efectos positivos y negativos en la sostenibilidad de especies de peces anádromas, como el salmón (O'Neel et al., 2015). En los ecosistemas costeros de Alaska, la variación en la cantidad y distribución de algas pelágicas cerca de la costa, así como en la abundancia de zooplancton, peces y aves marinas, se ha vinculado a cambios en el aporte de agua dulce glacial, en particular en términos de temperatura y turbidez (Arimitsu et al., 2016). En las regiones áridas de alta montaña, los glaciares también pueden ser, en ocasiones, la principal fuente de agua dulce que sustenta los humedales (Azócar y Brenning, 2010; Schaffer et al., 2019).

2.2.3 Riesgos

Las consecuencias del cambio climático, como el aumento de las temperaturas, la recesión de los glaciares, el deshielo del permafrost y la modificación de los patrones de precipitación, pueden incrementar el riesgo de inundaciones y deslizamientos de tierra (Carrivick y Tweed, 2016; Chiarle et al., 2021). Los procesos asociados a estos riesgos, como los flujos de detritos y las inundaciones, las avalanchas, los desprendimientos de rocas y las cascadas de hielo, las inundaciones por desbordamiento repentino de

presas y lagos glaciares⁸, son un grave problema. Se denominan colectivamente “peligros geológicos”, y pueden representar amenazas significativas para las comunidades, la fauna y la infraestructura en las regiones montañosas (Chiarle et al., 2021). Si bien estos eventos pueden ocurrir de forma aislada, es posible que se produzcan efectos en cascada (en los que un proceso desencadena otro), así como efectos de retroalimentación entre ellos (cuadro 2.3; Chiarle et al., 2021).

Se observan eventos de riesgo geológico en regiones montañosas de todo el mundo. Por ejemplo, en 2023, a lo largo del río Teesta en la India, una inundación por desbordamiento repentino de un lago glaciar provocó una rápida crecida de agua que alcanzó una altura de 5 a 6 m. Se reportaron al menos 30 muertes y una presa hidroeléctrica fue destruida (CESPAP, 2023). En los Andes de Chile central, la desglaciación probablemente influyó en el deslizamiento de tierra del arroyo Parraguirre, ocurrido en 1987; el flujo de escombros recorrió 57 km, causando la muerte de 37 personas y graves daños a la infraestructura (Sepúlveda et al., 2023).

Cuadro 2.3 Retroalimentación entre sequía de nieve, incendios forestales y flujos de escombros

Los efectos de retroalimentación entre el derretimiento de la nieve y el hielo, los impactos hidrológicos aguas abajo y la ocurrencia de incendios forestales pueden exacerbar los eventos de peligro geológico. Las temporadas más severas de incendios forestales suelen comenzar con sequías de nieve que consisten en el derretimiento temprano de una capa de nieve con un bajo equivalente en agua debido a inviernos cálidos y secos y un calor primaveral excepcional (Westerling et al., 2006). Los bosques de montaña quemados pueden reducir la capacidad de intercepción de lluvia y nevadas, la capacidad de almacenamiento de humedad del suelo debido a la quema de suelos orgánicos y la capacidad de infiltración, lo que aumenta el riesgo de escorrentía por deshielo e inundaciones por lluvia sobre nieve.

El potencial de flujos de escombros y deslizamientos de tierra también puede aumentar, ya que la ceniza y los suelos quemados pueden incrementar la profundidad del terreno suelto y móvil. Junto con la vegetación muerta o en descomposición, estos factores pueden provocar el arrastre de grandes volúmenes de escombros durante inundaciones o deslizamientos (Jakob et al., 2022; Vahedifard et al., 2024).

El cambio climático puede aumentar la vulnerabilidad de una ladera a eventos de peligro geológico. Mediante precipitaciones extremas y olas de calor, puede provocar dichos eventos.

Las consecuencias de los peligros geológicos incluyen amenazas a la salud y seguridad humanas, al hábitat de la fauna silvestre, al funcionamiento de la infraestructura y a las industrias turísticas. Los deslizamientos de tierra y las avalanchas pueden bloquear y dañar la infraestructura de transporte, causar devastación en asentamientos y poner en peligro las actividades humanas (Carey et al., 2012; 2021). Las inundaciones, especialmente las de ROS y por desbordamiento repentino de lagos glaciares, en entornos montañosos son igualmente preocupantes. Dependiendo del tamaño, la intensidad y el origen de la inundación, el arrastre de escombros y las corrientes torrenciales pueden causar daños similares (Haeberli et al., 2017; Clague y O'Connor, 2021). Estos riesgos geológicos también pueden afectar el turismo de montaña, las actividades de montañismo y la capacidad de respuesta ante emergencias, ya que dichos eventos pueden dañar la infraestructura de accesibilidad, destruir los sitios, rutas y paisajes más deseados (Hanly y McDowell, 2024) y desanimar quienes quisieran visitarlos (Wedgwood, 2014).

⁸ Inundaciones repentinas y catastróficas causadas por la rotura de presas naturales, generalmente formadas por morrenas glaciares o hielo, que contienen lagos glaciares. Estos eventos ocurren cuando la presión del agua aumenta detrás de la presa, provocando su colapso, lo cual puede ocurrir debido a la erosión, la actividad sísmica o la afluencia repentina de agua de deshielo.

Los riesgos geológicos resultan en costos reales para las personas, los medios de vida, la infraestructura y las economías. Las inundaciones por desbordamiento repentino de lagos glaciares por sí solos han causado más de 12 000 muertes en los últimos 200 años y graves daños a tierras de cultivo, viviendas, puentes, carreteras, centrales hidroeléctricas y bienes culturales, lo que a menudo ha provocado nuevos desplazamientos internos (Shrestha et al., 2010; Carrivick y Tweed, 2016). La superficie total y el número de lagos glaciares han aumentado significativamente desde la década de 1990 a medida que los glaciares han retrocedido. En las próximas décadas se formarán más lagos de este tipo, creando nuevos focos de riesgo o peligro potencial de inundaciones por desbordamiento repentino de lagos glaciares (Adler et al., 2022). Al igual que ocurre con muchos riesgos geológicos, los daños suelen ser mayores en los países de ingresos bajos y medios (cuadro 2.4) que en los países de ingresos altos (Carrivick y Tweed, 2016).

Según Stäubli et al. (2018), aunque no se limitaban a los riesgos geológicos de la criosfera, las pérdidas económicas absolutas en las regiones montañosas provocadas por 713 eventos ocurridos entre 1985 y 2014 superaron los 56 000 millones de dólares estadounidenses, afectaron a más de 258 millones de personas y causaron más de 39 000 muertes. El crecimiento de la población y la urbanización en las regiones montañosas también puede aumentar la exposición de las personas y los bienes a los riesgos geológicos y a las pérdidas y daños asociados (Thornton et al., 2022).

Cuadro 2.4 Gestión de inundaciones por desbordamiento repentino de lagos glaciares en el Perú

Las comunidades de la Cordillera Blanca del Perú llevan mucho tiempo gestionando las inundaciones por desbordamiento repentino de los lagos glaciares. Caídas de rocas, deslizamientos de tierra y desprendimientos de glaciares en cuerpos de agua han provocado eventos con impactos devastadores. Esto ha dado lugar a importantes iniciativas de ingeniería para mitigar la ocurrencia de acontecimientos de este tipo, incluyendo la disminución del nivel de los lagos y el reforzamiento de las presas de morrena para prevenir la erosión y las fallas.

Actualmente existen tuberías y túneles de drenaje, presas artificiales y sistemas de alerta temprana en múltiples lagos de los Andes (Mergili et al., 2020). Estos incluyen tuberías de drenaje que se alejan del lago Palcacocha, que en 1941 fue la fuente de una inundación por desbordamiento repentino de un lago glaciar que causó la muerte de aproximadamente 1 600 personas (Emmer, 2017; Carey et al., 2021).

Las consecuencias de los cambios en la criosfera se agravan para las poblaciones vulnerables (ICIMOD, 2022). Para los pueblos indígenas y comunidades locales (PICL) de las regiones montañosas, los impactos humanos de los cambios en la criosfera son profundos e incluyen la reducción de la capacidad de conseguir alimentos, la degradación de los pastos, la pérdida de mantos de nieve culturalmente significativos y el deterioro de fuentes de agua esenciales (figura 2.6; Caretta et al., 2022). Las mujeres de estas comunidades son especialmente vulnerables, ya que a menudo asumen responsabilidades desproporcionadas en cuanto a la alimentación y el agua (ICIMOD, 2022).

Figura 2.6 Impacto de los cambios en el clima, el agua y la criosfera en los pueblos indígenas y las comunidades locales en las regiones frías



Fuente: Caretta et al. (2022, fig. 4.6, p. 572).

2.3 Desafíos de la gestión del agua

Los sistemas hídricos influenciados por la criosfera de montaña se extienden mucho más allá de los valles de las montañas. Los cambios que afectan a la nieve y el hielo pueden impactar a las comunidades río abajo, que no necesariamente están conectadas con las montañas. Por lo tanto, es importante aumentar la concienciación sobre la criosfera y su papel en el ciclo global del agua, especialmente entre los gestores del agua y otros responsables de la toma de decisiones. La gestión y la planificación de infraestructuras suelen basarse en datos históricos que asumen estacionariedad. Sin embargo, el cambio climático ha demostrado la falacia de esta suposición, especialmente para sistemas alimentados por nieve y hielo (Milly et al., 2008). Esto aumenta la necesidad de modelar el riesgo futuro para respaldar la planificación a largo plazo.



Los cambios que afectan a la nieve y el hielo pueden impactar a las comunidades río abajo, que no necesariamente están conectadas con las montañas

Sin embargo, la modelización requiere información de los modelos climáticos globales, que presentan una alta incertidumbre en las zonas de alta montaña (véase el capítulo 8). Subsana las deficiencias en el monitoreo y la información debe ser una prioridad, también para captar los costos sanitarios, sociales y económicos reales e identificar los impactos potencialmente desproporcionados en las poblaciones. Los grupos vulnerables y marginados, como las mujeres, las personas en situación de pobreza y los pueblos indígenas y las comunidades locales en zonas de alta montaña, se verán afectados de manera desproporcionada por los impactos del cambio climático (Caretta et al., 2022).

Como torres de agua, las montañas desempeñan un papel vital en el almacenamiento de agua dulce y la generación de escorrentía. Los cambios en el calendario del deshielo estacional y la transición de flujos de nieve relativamente fiables a regímenes de lluvia y escorrentía más variables y menos predecibles, junto con la pérdida de la capacidad de amortiguación de los glaciares, pueden reducir la resiliencia de las comunidades en épocas de estrés (Somers et al., 2019; Carroll et al., 2024). Las tierras bajas aguas abajo suelen contribuir poco al caudal de los ríos procedentes de las montañas. Por lo tanto, incluso las comunidades que residen a miles de kilómetros de distancia pueden depender de las altas montañas para conseguir sus recursos hídricos (incluidas las aguas subterráneas) y obtener importantes beneficios de resiliencia de la criosfera de montaña (Whitfield et al., 2020).

La concienciación y la preparación ante la disminución de los servicios ecosistémicos que proporciona la criosfera deben integrarse en la formulación de políticas regionales, nacionales y mundiales. Las iniciativas de mitigación y adaptación incluyen: el uso del agua en zonas urbanas y agrícolas con sistemas alternativos de almacenamiento para compensar la pérdida de agua en la criosfera; la preservación de la sincronización de los flujos a través de los sistemas de almacenamiento superficial y subterráneo; la mejora de la tecnología y la eficiencia del riego; y el aumento de la eficiencia en el uso del agua. Sin embargo, si bien la eficiencia es importante, las estrategias para reducir la demanda absoluta de agua serán cruciales. Dichas intervenciones deben ser locales y requerirán un enfoque multifacético que incluya estrategias para reducir la pobreza, lograr la igualdad de género y el reconocimiento de los diferentes valores y usos culturales asociados al agua.

2.4 Conclusiones

Los impactos del declive de la criosfera de montaña sobre los recursos hídricos son complejos y varían entre las cuencas aguas arriba y las regiones aguas abajo. Una disminución del EAN estacional y de la duración de la nieve provocará un adelanto en el tiempo de deshielo y una reducción del pico del hidrograma de crecida, con una disminución de los caudales base al final de la temporada y una mayor dependencia de la escorrentía pluvial y de las aguas subterráneas. Esto afectará el suministro de agua y aumentará la sequía estival en vastas regiones aguas abajo. La aceleración del tiempo y el aumento de la magnitud del deshielo de los glaciares con el calentamiento atmosférico parecen mitigar la disminución del suministro de agua proveniente del deshielo de la nieve, especialmente en los períodos más cálidos y secos, a corto plazo. Sin embargo, dichos fenómenos son transitorios, de volumen limitado y disminuirán considerablemente a finales de este siglo.

El momento y la duración del deshielo son cruciales para la integridad de los ecosistemas, la recarga de aguas subterráneas y la seguridad alimentaria. Los riesgos naturales, como los deslizamientos de tierra, las inundaciones y los flujos de detritos, y los desastres de evolución lenta, como los asociados a la sequía, se ven influenciados por el estado de la criosfera. Los impactos en la disponibilidad de agua y los niveles de riesgo se ven influenciados por numerosos factores; no es posible realizar análisis simplistas y universales. Esto plantea desafíos para la gestión sostenible y equitativa de la calidad y la cantidad del agua, lo que contribuye a la salud y el bienestar humanos, la integridad de los ecosistemas terrestres y acuáticos, y el fortalecimiento de las economías y comunidades.

Referencias

- Adler, C., Wester, P., Bhatt, I., Huggel, C., Insarov, G., Morecroft, M., Muccione, V. y Prakash, A. 2022. Mountains. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem y B. Rama (eds), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribución del Grupo de Trabajo II al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge, Reino Unido/Nueva York, Cambridge University Press, pp. 2273-2318. doi.org/10.1017/9781009325844.022.
- Arenson, L. U., Harrington, J. S., Koenig, C. E. y Wainstein, P. A. 2022. Mountain permafrost hydrology – A practical review following studies from the Andes. *Geosciences*, Vol. 12, No. 2, p. 48. doi.org/10.3390/geosciences12020048.
- Arimitsu, M. L., Piatt, J. F. y Mueter, F. 2016. Influence of glacier runoff on ecosystem structure in Gulf of Alaska fjords. *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 560, pp. 19-40. doi.org/10.3354/meps11888.
- Aubry-Wake, C., Bertoincini, A. y Pomeroy, J. W. 2022. Fire and ice: The impact of wildfire-affected albedo and irradiance on glacier melt. *Earth's Future*, Vol. 10, No. 4, Artículo e2022EF002685. doi.org/10.1029/2022EF002685.
- Azócar, G. F. y Brenning, A. 2010. Hydrological and geomorphological significance of rock glaciers in the dry Andes, Chile (27°–33°S). *Permafrost and Periglacial Processes*, Vol. 21, No. 1, pp. 42-53. doi.org/10.1002/ppp.669.
- Barnett, T. P., Adam, J. C. y Lettenmaier, D. P. 2005. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, Vol. 438, No. 7066, pp. 303-309. doi.org/10.1038/nature04141.
- Bernhardt, M. y Schulz, K. 2010. SnowSlide: A simple routine for calculating gravitational snow transport. *Geophysical Research Letters*, Vol. 37, No. 11. doi.org/10.1029/2010GL043086.
- Bertoincini, A. 2024. *Using Enhanced Observations to Improve Streamflow Prediction in Cold Mountain River Basins*. Tesis doctoral, Universidad de Saskatchewan. hdl.handle.net/10388/15563.
- Bertoincini, A., Aubry-Wake, C. y Pomeroy, J. W. 2022. Large-area high spatial resolution albedo retrievals from remote sensing for use in assessing the impact of wildfire soot deposition on high mountain snow and ice melt. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 278, Artículo 113101. doi.org/10.1016/j.rse.2022.113101.
- Buytaert, W., Moulds, S., Acosta, L., De Bièvre, B., Olmos, C., Villacis, M., Tovar, C. y Verbist, K. M. 2017. Glacial melt content of water use in the Tropical Andes. *Environmental Research Letters*, Vol. 12, No. 11, Artículo 114014. doi.org/10.1088/1748-9326/aa926c.
- Caretta, M. A., Mukherji, A., Arfanuzzaman, M., Betts, R. A., Gelfan, A., Hirabayashi, Y., Lissner, T. K., Liu, J., Lopez Gunn, E., Morgan, R., Mwanga, S. y Supratid, S. 2022. Water. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem y B. Rama (eds), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribución del Grupo de Trabajo II al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge, Reino Unido/Nueva York, Cambridge University Press, pp. 551-712. doi.org/10.1017/9781009325844.006.
- Carey, M., Huggel, C., Bury, J., Portocarrero, C. y Haeberli, W. 2012. An integrated socio-environmental framework for glacier hazard management and climate change adaptation: Lessons from Lake 513, Cordillera Blanca, Peru. *Climatic Change*, Vol. 112, pp. 733-767. doi.org/10.1007/s10584-011-0249-8.
- Carey, M., McDowell, G., Huggel, C., Marshall, B., Moulton, H., Portocarrero, C., Provant, Z., Reynolds, J. M. y Vicuña, L. 2021. Chapter 8 – A socio-cryospheric systems approach to glacier hazards, glacier runoff variability, and climate change. W. Haeberli y C. Whiteman (eds), *Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters (Second Edition)*. Ámsterdam/Oxford, Reino Unido/Cambridge, EE.UU., Elsevier, pp. 215-257. doi.org/10.1016/B978-0-12-817129-5.00018-4.
- Carrivick, J. L. y Tweed, F. S. 2016. A global assessment of the societal impacts of glacier outburst floods. *Global and Planetary Change*, Vol. 144, pp. 1-16. doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.07.001.
- Carroll, R. W., Niswonger, R. G., Ulrich, C., Varadharajan, C., Siirila-Woodburn, E. R. y Williams, K. H. 2024. Declining groundwater storage expected to amplify mountain streamflow reductions in a warmer world. *Nature Water*, Vol. 2, No. 5, pp. 419-433. doi.org/10.1038/s44221-024-00239-0.
- CESPAP (Comisión Económica y Social para Asia y el Pacífico). 2023. *Climate Catastrophe in the Sikkim Himalayas: Twin Tack Resilience Strategy*. Sitio web de la CESPAP, blogs, 23 de octubre de 2023. www.unescap.org/blog/climate-catastrophe-sikkim-himalayas-twin-track-resilience-strategy.
- Chiarle, M., Geertsema, M., Mortara, G. y Clague, J. J. 2021. Relations between climate change and mass movement: Perspectives from the Canadian Cordillera and the European Alps. *Global and Planetary Change*, Vol. 202, Artículo 103499. doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103499.
- Clague, J. J. y O'Connor, J. E. 2021. Chapter 14 – Glacier-related outburst floods. W. Haeberli y C. Whiteman (eds), *Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters (Second Edition)*. Ámsterdam/Oxford, Reino Unido/Cambridge, EE.UU., Elsevier, pp. 467-499. doi.org/10.1016/B978-0-12-817129-5.00019-6.
- Cook, S. J., Jouvett, G., Millan, R., Rabatel, A., Zekollari, H. y Dussailant, I. 2023. Committed ice loss in the European Alps until 2050 using a deep-learning-aided 3D ice-flow model with data assimilation. *Geophysical Research Letters*, Vol. 50, No. 23, Artículo e2023GL105029. doi.org/10.1029/2023GL105029.
- Cunsolo, A., Borish, D., Harper, S. L., Snook, J., Shiwak, I. y Wood, M. 2020. "You can never replace the caribou": Inuit experiences of ecological grief from caribou declines. *American Imago*, Vol. 77, No. 1, pp. 31-59. doi.org/10.1353/aim.2020.0002.
- DeBeer, C. M., Sharp, M. y Schuster-Wallace, C. 2020. Glaciers and ice sheets. M. I. Goldstein and D. A. DellaSala (eds), *Encyclopedia of the World's Biomes*. Ámsterdam/Oxford, Reino Unido/Cambridge, EE.UU., Elsevier, pp. 182-194. doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12441-8.
- Ellis, C. R., Pomeroy, J. W. y Link, T. E. 2013. Modeling increases in snowmelt yield and desynchronization resulting from forest gap-thinning treatments in a northern mountain headwater basin. *Water Resources Research*, Vol. 49, No. 2, pp. 936-949. doi.org/10.1002/wrcr.20089.
- Emmer, A. 2017. Geomorphologically effective floods from moraine-dammed lakes in the Cordillera Blanca, Peru. *Quaternary Science Reviews*, Vol. 177, pp. 220-234. doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.10.028.
- Essery, R. y Pomeroy, J. 2004. Implications of spatial distributions of snow mass and melt rate for snow-cover depletion: Theoretical considerations. *Annals of Glaciology*, Vol. 38, pp. 261-265. doi.org/10.3189/172756404781815275.
- Fang, X. y Pomeroy, J. W. 2023. Simulation of the impact of future changes in climate on the hydrology of Bow River headwater basins in the Canadian Rockies. *Journal of Hydrology*, Vol. 620, Artículo 129566. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129566.
- Forbes, B. C., Turunen, M. T., Soppela, P., Rasmus, S., Vuojala-Magga, T. y Kittl, H. 2019. Changes in mountain birch forests and reindeer management: Comparing different knowledge systems in Sápmi, northern Fennoscandia. *Polar Record*, Vol. 55, No. 6, pp. 507-521. doi.org/10.1017/S0032247419000834.
- Ford, J. D., Clark, D., Pearce, T., Berrang-Ford, L., Copland, L., Dawson, J., New, M. y Harper, S. L. 2019. Changing access to ice, land and water in Arctic communities. *Nature Climate Change*, Vol. 9, No. 4, pp. 335-339. doi.org/10.1038/s41558-019-0435-7.
- Gascoin, S. 2024. A call for an accurate presentation of glaciers as water resources. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, Vol. 11, No. 2, Artículo e1705. doi.org/10.1002/wat2.1705.

- Gentle, P. y Thwaites, R. 2016. Transhumant pastoralism in the context of socioeconomic and climate change in the mountains of Nepal. *Mountain Research and Development*, Vol. 36, No. 2, pp. 173-182. doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-15-00011.1.
- Haeberli, W., Schaub, Y. y Huggel, C. 2017. Increasing risks related to landslides from degrading permafrost into new lakes in deglaciating mountain ranges. *Geomorphology*, Vol. 293, pp. 405-417. doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.02.009.
- Hanly, K. y McDowell, G. 2024. The evolution of 'risky landscapes': 100 years of climate change and mountaineering activity in the Lake Louise area of the Canadian Rockies. *Climatic Change*, Vol. 177, Artículo 49. doi.org/10.1007/s10584-024-03698-2.
- Harrington, J. S., Hayashi, M. y Kurylyk, B. L. 2017. Influence of a rock glacier spring on the stream energy budget and cold-water refuge in an alpine stream. *Hydrological Processes*, Vol. 31, No. 26, pp. 4719-4733. doi.org/10.1002/hyp.11391.
- Hedstrom, N. R. y Pomeroy, J. W. 1998. Measurements and modelling of snow interception in the boreal forest. *Hydrological Processes*, Vol. 12, No. 10-11, pp. 1611-1625. doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199808/09)12:10/11<1611::AID-HYP684>3.0.CO;2-4.
- Hock, R., Rasul, G., Adler, C., Cáceres, B., Gruber, S., Hirabayashi, Y., Jackson, M., Kääb, A., Kang, S., Kutuzov, S., Milner, A., Molau, U., Morin, S., Orlove, B. y Steltzer, H. 2019a. High mountain areas. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama y N. M. Weyer (eds), *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Reino Unido/Nueva York, Cambridge University Press, pp. 131-202. doi.org/10.1017/9781009157964.004.
- Hock, R., Bliss, A., Marzeion, B. E. N., Giesen, R. H., Hirabayashi, Y., Huss, M., Radić, V. y Slangen, A. B. 2019b. GlacierMIP – A model intercomparison of global-scale glacier mass-balance models and projections. *Journal of Glaciology*, Vol. 65, No. 251, pp. 453-467. doi.org/10.1017/jog.2019.22.
- Hopkinson, C. y Young, G. J. 1998. The effect of glacier wastage on the flow of the Bow River at Banff, Alberta, 1951–1993. *Hydrological Processes*, Vol. 12, No. 10-11, pp. 1745-1762. doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199808/09)12:10/11<1745::AID-HYP692>3E3.0.CO;2-S.
- Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., Farinotti, D., Huss, M., Dussaillant, I., Brun, F. y Kääb, A. 2021. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*, Vol. 592, pp. 726-731. doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z.
- Huss, M. y Hock, R. 2018. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nature Climate Change*, Vol. 8, No. 2, pp. 135-140. doi.org/10.1038/s41558-017-0049-x.
- ICIMOD (Centro Internacional para la Ordenación Integrada de las Montañas). 2022. *State of Gender Equality and Climate Change in South Asia and the Hindu Kush Himalaya*. Katmandú, ICIMOD. lib.icimod.org/record/35996.
- Ilyashuk, B. P., Ilyashuk, E. A., Psenner, R., Tessadri, R. y Koinig, K. A. 2018. Rock glaciers in crystalline catchments: Hidden permafrost-related threats to alpine headwater lakes. *Global Change Biology*, Vol. 24, No. 4, pp. 1548-1562. doi.org/10.1111/gcb.13985.
- Immerzeel, W. W., Lutz, A. F., Andrade, M., Bahl, A., Biemans, H., Bolch, T., Hyde, S., Brumby, S., Davies, B. J., Elmore, A. C., Emmer, A., Feng, M., Fernández, A., Haritashya, U., Kargel, J. S., Koppes, M., Kraaijenbrink, P. D. A., Kulkarni, A. V., Mayewski, P. A., Nepal, S., Pacheco, P., Painter, T. H., Pellicciotti, F., Rajaram, H., Rupper, S., Sinisalo, A., Shrestha, A. B., Viviroli, D., Wada, W., Xiao, C., Yao, T. y Baillie, J. E. M. 2020. Importance and vulnerability of the world's water towers. *Nature*, Vol. 577, pp. 364-369. doi.org/10.1038/s41586-019-1822-y.
- Ingty, T. 2017. High mountain communities and climate change: Adaptation, traditional ecological knowledge, and institutions. *Climatic Change*, Vol. 145, No. 1, pp. 41-55. doi.org/10.1007/s10584-017-2080-3.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2023. *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, H. Lee y J. Romero (eds)]. Ginebra, IPCC, pp. 1-34. doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.
- Jakob, M., Davidson, S., Bullard, G., Busslinger, M., Collier-Pandya, B., Grover, P. y Lau, C. A. 2022. Debris-flood hazard assessments in steep streams. *Water Resources Research*, Vol. 58, No. 4, Artículo e2021WR030907. doi.org/10.1029/2021WR030907.
- Jones, H. G., Pomeroy, J. W., Walker, D. A. y Hoham, R. W. (eds). 2001. *Snow Ecology: An Interdisciplinary Examination of Snow-Covered Ecosystems*. Cambridge, Reino Unido, Cambridge University Press.
- Kaser, G., Großhauser, M. y Marzeion, B. 2010. Contribution potential of glaciers to water availability in different climate regimes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, Vol. 107, No. 47, pp. 20223-20227. doi.org/10.1073/pnas.1008162107.
- Khalafzai, M.-A. K., McGee, T. K. y Parlee, B. 2019. Flooding in the James Bay region of Northern Ontario, Canada: Learning from traditional knowledge of Kasechewan First Nation. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 36, Artículo 101100. doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101100.
- Konchar, K. M., Staver, B., Salick, J., Chapagain, A., Joshi, L., Karki, S., Lo, S., Paudel, A., Subedi, P. y Ghimire, S. K. 2015. Adapting in the shadow of Annapurna: A climate tipping point. *Journal of Ethnobiology*, Vol. 35, No. 3, pp. 449-471. doi.org/10.2993/0278-0771-35.3.449.
- Lehning, M., Löwe, H., Ryser, M. y Raderschall, N. 2008. Inhomogeneous precipitation distribution and snow transport in steep terrain. *Water Resources Research*, Vol. 44, No. 7. doi.org/10.1029/2007WR006545.
- López-Moreno, J. I., Pomeroy, J. W., Alonso-González, E., Morán-Tejeda, E. y Revuelto, J. 2020. Decoupling of warming mountain snowpacks from hydrological regimes. *Environmental Research Letters*, Vol. 15, No. 11, Artículo 114006. doi.org/10.1088/1748-9326/abb55f.
- López-Moreno, J. I., Pomeroy, J. W., Morán-Tejeda, E., Revuelto, J., Navarro-Serrano, F. M., Vidaller, I. y Alonso-González, E. 2021. Changes in the frequency of global high mountain rain-on-snow events due to climate warming. *Environmental Research Letters*, Vol. 16, No. 9, Artículo 094021. doi.org/10.1088/1748-9326/ac0dde.
- Marks, D., Kimball, J., Tingey, D. y Link, T. 1998. The sensitivity of snowmelt processes to climate conditions and forest cover during rain-on-snow: A case study of the 1996 Pacific Northwest flood. *Hydrological Processes*, Vol. 12, No. 10-11, pp. 1569-1587. doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199808/09)12:10/11<1569::AID-HYP682>3.0.CO;2-L.
- Mergili, M., Pudasaini, S. P., Emmer, A., Fischer, J. T., Cochachin, A. y Frey, H. 2020. Reconstruction of the 1941 GLOF process chain at Lake Palcacocha (Cordillera Blanca, Peru). *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 24, No. 1, pp. 93-114. doi.org/10.5194/hess-24-93-2020.
- Miles, K. E., Hubbard, B., Irvine-Fynn, T. D., Miles, E. S., Quincey, D. J. y Rowan, A. V. 2020. Hydrology of debris-covered glaciers in High Mountain Asia. *Earth-Science Reviews*, Vol. 207, Artículo 103212. doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103212.
- Milly, P. C., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R. M., Kundzewicz, Z. W., Lettenmaier, D. P. y Stouffer, R. J. 2008. Stationarity is dead: Whither water management? *Science*, Vol. 319, No. 5863, pp. 573-574. doi.org/10.1126/science.1151915.
- Milner, A. M., Khamis, K., Battin, T. J., Brittain, J. E., Barrand, N. E., Füreder, L., Cauvy-Fraunié, S., Már Gíslason, G., Jacobsen, D., Hannah, D. M., Hodson, A. J., Hood, E., Lencioni, V., Ólafsson, J. S., Robinson, C. T., Tranter, M. y Brown, L. E. 2017. Glacier shrinkage driving global changes in downstream systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, Vol. 114, No. 37, pp. 9770-9778. doi.org/10.1073/pnas.1619807114.

- Iniciativa para el Estudio de las Montañas – Grupo de trabajo EDW. 2015. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature Climate Change*, Vol. 5, pp. 424-430. doi.org/10.1038/nclimate2563.
- Müller, T., Lane, S. N. y Schaeffli, B. 2022. Towards a hydrogeomorphological understanding of proglacial catchments: An assessment of groundwater storage and release in an Alpine catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 26, No. 23, pp. 6029-6054. doi.org/10.5194/hess-26-6029-2022.
- Norton-Smith, K., Lynn, K., Chief, K., Cozzetto, K., Donatuto, J., Hiza Redsteer, M., Kruger, L. E., Maldonado, J., Viles, C. y Whyte, K. P. 2016. *Climate Change and Indigenous Peoples: A Synthesis of Current Impacts and Experiences*. General Technical Report PNW-GTR-944. Portland, EE.UU., Ministerio de Agricultura de los Estados Unidos, Servicio Forestal, Centro de Investigación del Pacífico Noroeste. doi.org/10.2737/PNW-GTR-944.
- Nyima, Y. y Hopping, K. A. 2019. Tibetan lake expansion from a pastoral perspective: Local observations and coping strategies for a changing environment. *Society and Natural Resources*, Vol. 32, No. 9, pp. 965-982. doi.org/10.1080/08941920.2019.1590667.
- O’Neel, S., Hood, E., Bidlack, A. L., Fleming, S. W., Arimitsu, M. L., Arendt, A., Burgess, E., Sergeant, C. J., Beaudreau, A. H., Timm, K., Hayward, G. D., Reynolds, J. H. y Pyare, S. 2015. Icefield-to-ocean linkages across the northern Pacific coastal temperate rainforest ecosystem. *BioScience*, Vol. 65, No. 5, pp. 499-512. doi.org/10.1093/biosci/biv027.
- Pepin, N. C., Arnone, E., Gobiet, A., Haslinger, K., Kotlarski, S., Notarnicola, C., Palazzi, E., Seibert, P., Serafin, S., Schöner, W., Terzago, S., Thornton, J. M., Vuille, M. y Adler, C. 2022. Climate changes and their elevational patterns in the mountains of the world. *Reviews of Geophysics*, Vol. 60, No. 1, Artículo e2020RG000730. doi.org/10.1029/2020RG000730.
- Pomeroy, J. W. y Li, L. 2000. Prairie and arctic areal snow cover mass balance using a blowing snow model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 105, No. D21, pp. 26619-26634. doi.org/10.1029/2000JD900149.
- Pomeroy, J. W., Brown, T., Fang, X., Shook, K. R., Pradhananga, D., Armstrong, R., Harder, P., Marsh, C., Costa, D., Krogh, S. A., Aubry-Wake, C., Annand, H., Lawford, P., He, Z., Kompanizare, M. y Lopéz Moreno, J. L. 2022. The cold regions hydrological modelling platform for hydrological diagnosis and prediction based on process understanding. *Journal of Hydrology*, Vol. 615, Artículo 128711. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128711.
- Postigo, J. C. 2020. The role of social institutions in indigenous Andean pastoralists’ adaptation to climate-related water hazards. *Climate and Development*, Vol. 13, No. 9, pp. 780-791. doi.org/10.1080/17565529.2020.1850409.
- Rasmus, S., Turunen, M., Luomaranta, A., Kivinen, S., Jylhä, K. y Räihä, J. 2020. Climate change and reindeer management in Finland: Co-analysis of practitioner knowledge and meteorological data for better adaptation. *Science of the Total Environment*, Vol. 710, Artículo 136229. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136229.
- Rasouli, K., Pomeroy, J. W. y Whitfield, P. H. 2019. Are the effects of vegetation and soil changes as important as climate change impacts on hydrological processes? *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 23, No. 12, pp. 4933-4954. doi.org/10.5194/hess-23-4933-2019.
- Rounce, D. R., Hock, R., Maussion, F., Hugonnet, R., Kochtitzky, W., Huss, M., Berthier, E., Compagno, L., Copland, L., Farinotti, D., Menounos, B. y McNabb, R. W. 2023. Global glacier change in the 21st century: Every increase in temperature matters. *Science*, Vol. 379, No. 6627, pp. 78-83. doi.org/10.1126/science.abo1324.
- Schaffer, N., MacDonell, S., Réveillet, M., Yáñez, E. y Valois, R. 2019. Rock glaciers as a water resource in a changing climate in the semiarid Chilean Andes. *Regional Environmental Change*, Vol. 19, pp. 1263-1279. doi.org/10.1007/s10113-018-01459-3.
- Sepúlveda, S. A., Tobar, C., Rosales, V., Ochoa-Cornejo, F. y Lara, M. 2023. Megalandslides and deglaciation: Modelling of two case studies in the Central Andes. *Natural Hazards*, Vol. 118, No. 2, pp. 1561-1572. doi.org/10.1007/s11069-023-06067-x.
- Sharp, M. y Tranter, M. 2017. Glacier biogeochemistry. *Geochemical Perspectives*, Vol. 6, No. 2, pp. 173-174. doi.org/10.7185/geochempersp.6.2.
- Shrestha, A. B., Eriksson, M., Mool, P., Ghimire, P., Mishra, B. y Khanal, N. R. 2010. Glacial lake outburst flood risk assessment of Sun Koshi basin, Nepal. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, Vol. 1, No. 2, pp. 157-169. doi.org/10.1080/19475701003668968.
- Somers, L. D. y McKenzie, J. M. 2020. A review of groundwater in high mountain environments. *Wiley Interdisciplinary Reviews (WIREs): Water*, Vol. 7, No. 6, Artículo e1475. doi.org/10.1002/wat2.1475.
- Somers, L. D., McKenzie, J. M., Mark, B. G., Lagos, P., Ng, G. H. C., Wickert, A. D., Yarleque, C., Baraër, M. y Silva, Y. 2019. Groundwater buffers decreasing glacier melt in an Andean watershed – but not forever. *Geophysical Research Letters*, Vol. 46, No. 22, pp. 13016-13026. doi.org/10.1029/2019GL084730.
- Stäubli, A., Nussbaumer, S. U., Allen, S. K., Huggel, C., Arguello, M., Costa, F., Hergarten, C., Martínez, R., Soto, J., Vargas, R., Zambrano, E. y Zimmermann, M. 2018. Analysis of weather-and climate-related disasters in mountain regions using different disaster databases. S. Mal, R. Singh y C. Huggel (eds), *Climate Change, Extreme Events and Disaster Risk Reduction: Towards Sustainable Development Goals*. Cham, Suiza, Springer, pp. 17-41. doi.org/10.1007/978-3-319-56469-2_2.
- Thornton, J. M., Snethlage, M. A., Sayre, R., Urbach, D. R., Viviroli, D., Ehrlich, D., Muccione, V., Wester, P., Insarov, G. y Adler, C. 2022. Human populations in the world’s mountains: Spatio-temporal patterns and potential controls. *PLoS ONE*, Vol. 17, No. 7, Artículo e0271466. doi.org/10.1371/journal.pone.0271466.
- UNESCO/UICN (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura/Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza). 2022. *World Heritage Glaciers: Sentinels of Climate Change*. París/Gland, Suiza, UNESCO/UICN. doi.org/10.3929/ethz-b-000578916.
- USGS (Servicio Geológico de Estados Unidos). 2013. Glossary of Glacier Terminology. Sitio web del USGS. pubs.usgs.gov/of/2004/1216/f/f.html#:~:text=An%20intermediate%20stage%20in%20the,takes%20less%20than%20a%20year (consultado el 22 de julio de 2024).
- . 2019. Sublimation and the Water Cycle. Sitio web del USGS. www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/sublimation-and-water-cycle#:~:text=Sublimation%20is%20the%20conversion%20and,with%20no%20intermediate%20liquid%20stage (consultado el 22 de julio de 2024).
- Vahedifard, F., Abdollahi, M., Leshchinsky, B. A., Stark, T. D., Sadegh, M. y AghaKouchak, A. 2024. Interdependencies between wildfire-induced alterations in soil properties, near-surface processes, and geohazards. *Earth and Space Science*, Vol. 11, No. 2, Artículo e2023EA003498. doi.org/10.1029/2023EA003498.
- Vanderwall, J. W., Muhlfeld, C. C., Tappenbeck, T. H., Giersch, J., Ren, Z. y Elser, J. J. 2024. Mountain glaciers influence biogeochemical and ecological characteristics of high-elevation lakes across the northern Rocky Mountains, USA. *Limnology and Oceanography*, Vol. 69, No. 1, pp. 37-52. doi.org/10.1002/lno.12434.
- Van Tiel, M., Aubry-Wake, C., Somers, L., Andermann, C., Avanzi, F., Baraer, M., Chiogna, G., Daigre, C., Das, S., Drenkhan, F., Farinotti, D., Fyffe, C. L., de Graaf, I., Hanus, S., Immerzeel, W., Koch, F., McKenzie, J. M., Müller, T., Popp, A. L., Saidaliyeva, Z., Schaeffli, B., Schilling, O. S., Teagai, K., Thornton, J. M. y Yapiyev, V. 2024. Cryosphere-groundwater connectivity is a missing link in the mountain water cycle. *Nature Water*, Vol. 2, No. 7, pp. 624-637. doi.org/10.1038/s44221-024-00277-8.

- Verrall, B. y Pickering, C. M. 2020. Alpine vegetation in the context of climate change: A global review of past research and future directions. *Science of the Total Environment*, Vol. 748, Artículo 141344. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141344.
- Viviroli, D., Kumm, M., Meybeck, M., Kallio, M. y Wada, Y. 2020. Increasing dependence of lowland populations on mountain water resources. *Nature Sustainability*, Vol. 3, No. 11, pp. 917-928. doi.org/10.1038/s41893-020-0559-9.
- Wedgwood, R. 2014. *Gone like a ghost: The ghost glacier failure and subsequent outburst flood, Mt. Edith Cavell, Jasper National Park*. Sexta Conferencia Canadiense sobre Riesgos Geológicos – GeoHazards (Vol. 6). cgs.ca/docs/geohazards/kingston2014/Geo2014/pdfs/geoHaz6Paper201.pdf.
- Westerling, A. L., Hidalgo, H. G., Cayan, D. R. y Swetnam, T. W. 2006. Warming and earlier spring increase western U.S. forest wildfire activity. *Science*, Vol. 313, No. 5789, pp. 940-943. doi.org/10.1126/science.1128834.
- Whitfield, P. H., Kraaijenbrink, P. D., Shook, K. R. y Pomeroy, J. W. 2020. The spatial extent of hydrological and landscape changes across the mountains and prairies of the Saskatchewan and Mackenzie basins. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, pp. 1-68. doi.org/10.5194/hess-2019-671.
- Williamson, C. J., Cameron, K. A., Cook, J. M., Zarsky, J. D., Stibal, M. y Edwards, A. 2019. Glacier algae: A dark past and a darker future. *Frontiers in Microbiology*, Vol. 10, Artículo 436973. doi.org/10.3389/fmicb.2019.00524.
- Yager, K., Valdivia, C., Slayback, D., Jiménez, E., Meneses, R. I., Palabral, A., Bracho, M., Romero, D., Hubbard, A., Pacheco, P., Calle, A., Alberto, H., Yana, O., Ulloa, D., Zeballos, G. y Romero, A. 2019. Socio-ecological dimensions of Andean pastoral landscape change: Bridging traditional ecological knowledge and satellite image analysis in Sajama National Park, Bolivia. *Regional Environmental Change*, Vol. 19, No. 5, pp. 1353-1369. doi.org/10.1007/s10113-019-01466-y.
- Zemp, M., Huss, M., Thibert, E., Eckert, N., McNabb, R., Huber, J., Barandun, M., Machguth, H., Nussbaumer, S. U., Gärtner-Roer, I., Thomson, L., Paul, F., Maussion, F., Kutuzov, S. y Cogley, J. G. 2019. Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016. *Nature*, Vol. 568, No. 7752, pp. 382-386. doi.org/10.1038/s41586-019-1071-0.
- Zhang, Y., Gao, T., Kang, S., Shangguan, D. y Luo, X. 2021. Albedo reduction as an important driver for glacier melting in Tibetan Plateau and its surrounding areas. *Earth-Science Reviews*, Vol. 220, Artículo 103735. doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103735.

Capítulo 3

Alimentación y agricultura

FAO

Matthew England, Patricia Mejías-Moreno, Jippe Hoogeveen,
Rosaura Romeo, Sara Manuelli y Fabio Parisi

3.1 Seguridad alimentaria y agricultura

● ● ●
La agricultura y el pastoreo son fuentes esenciales de sustento para la población de las zonas de montaña

Este capítulo se estructura en torno a tres temas principales: el estado de la seguridad alimentaria y la agricultura en las montañas, los retos debidos al cambio climático y otros factores que afectan a la disponibilidad de agua para la agricultura y la seguridad alimentaria, así como las posibles opciones de respuesta.

3.1.1 Seguridad alimentaria en las montañas

La agricultura y el pastoreo son fuentes esenciales de sustento⁹ para la población de las zonas de montaña¹⁰ (FAO, 2019), donde se calcula que viven 1 100 millones de personas. Se estima que en los países en desarrollo 648 millones de personas viven en zonas rurales de montaña, donde la mayor parte de la población subsiste gracias a la agricultura y el pastoreo. Además, se estima que más de la mitad de estas personas (346 millones) eran vulnerables a la inseguridad alimentaria en 2017. En otras palabras, uno de cada dos habitantes de las zonas rurales de montaña de los países en desarrollo vivía en zonas donde se estimaba que la disponibilidad diaria de calorías y proteínas estaba por debajo del umbral mínimo necesario para llevar una vida sana (Romeo et al., 2020). En la región del Hindu Kush Himalaya (HKH), más del 30 % de la población de montaña sufre inseguridad alimentaria, siendo las mujeres y los niños los más expuestos (Wester et al., 2019).

Entre los factores que contribuyen a la inseguridad alimentaria en las montañas se encuentran la variabilidad climática, los fenómenos meteorológicos extremos, las catástrofes causadas por riesgos naturales, la geografía física y la socioeconomía (cuadro 3.1). La seguridad alimentaria puede verse aún más limitada por la lejanía y la inaccesibilidad (por ejemplo, la distancia a las carreteras y los mercados de alimentos), las temporadas de cultivo, los conflictos, la degradación de la tierra (que determina la mala calidad de los suelos), las grandes variaciones en el suministro de agua para la agricultura y los bajos niveles de mecanización (Romeo et al., 2020).

En las cuencas fluviales alimentadas por el deshielo de la criosfera, la productividad agrícola aguas abajo en las tierras bajas se ve amenazada por los fenómenos relativos al deshielo de la criosfera aguas arriba. Los crecientes niveles de fusión de la nieve y el hielo están provocando una mayor variabilidad estacional (en términos de calendario y volumen) de la escorrentía y el caudal de los ríos (Viviroli et al., 2020). Esto se ha documentado, por ejemplo, en las llanuras indogangéticas de Asia Meridional, donde plantea problemas a los agricultores de la cuenca del río Indo que dependen del deshielo de la criosfera para el riego en la estación seca (Biemans et al., 2019).

3.1.2 La agricultura de montaña

La agricultura de montaña se define en términos generales como el conjunto de actividades agrícolas que se realizan en terrenos situados a gran altitud y en laderas de montaña, incluidas las prácticas de captación y conservación del agua. Los sistemas de producción agrícola en las montañas incluyen la producción de cultivos de secano y de regadío, la agricultura pastoral y agropastoral, la silvicultura y la agrosilvicultura, la captura de peces de agua dulce y la acuicultura (FAO, 2022). Parcelas pequeñas y

⁹ Junto con fuentes de ingresos no agrícolas como las remesas, los pequeños negocios, las plantas medicinales, el trabajo asalariado y el turismo (FAO, 2019).

¹⁰ La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura utiliza la definición de montañas del Centro Mundial de Vigilancia de la Conservación del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (Romeo et al., 2020, p. 8).

Cuadro 3.1 La seguridad alimentaria y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

“Existe seguridad alimentaria cuando todas las personas tienen en todo momento acceso físico y económico a suficientes alimentos inocuos y nutritivos para satisfacer sus necesidades alimenticias y sus preferencias en cuanto a los alimentos a fin de llevar una vida activa y sana” (FAO, 1996, punto 1). La seguridad alimentaria tiene cuatro dimensiones: disponibilidad, accesibilidad, utilización y estabilidad (FAO, 2014).

La disponibilidad de alimentos se refiere a la disponibilidad física de niveles adecuados de alimentos en una zona determinada.

La accesibilidad a los alimentos se refiere a la posibilidad de acceder física y económicamente a los alimentos.

La utilización de los alimentos se refiere a su calidad, seguridad y absorción, compaginada con un estado de salud adecuado.

La estabilidad alimentaria está garantizada cuando la disponibilidad, la accesibilidad y la utilización de los alimentos permanecen seguras durante todo el año y a lo largo de un período prolongado (Grupo del Banco Mundial, s.f.).

Por lo tanto, la seguridad alimentaria es fundamental para alcanzar numerosos ODS, incluidos el ODS 1 (fin de la pobreza), el ODS 2 (hambre cero), el ODS 3 (salud y bienestar), el ODS 6 (agua limpia y saneamiento), el ODS 12 (producción y consumo responsables) y el ODS 13 (acción por el clima), así como el indicador 15.4.2 de los ODS (índice de cobertura verde de las montañas).

Las comunidades de montaña conservan muchas de las variedades de cultivos y plantas medicinales más raras

fragmentadas, cultivadas principalmente por pequeños agricultores¹¹, caracterizan a la agricultura de montaña. Se calcula que el 45 % de las zonas montañosas del mundo no son aptas, o lo son solo marginalmente, para el cultivo, el pastoreo o la realización de actividades forestales (Romeo et al., 2020). A medida que aumenta la altitud, los suelos se vuelven menos profundos y fértiles, con temperaturas más bajas que limitan la actividad biológica. En las zonas expuestas, los suelos suelen sufrir la lixiviación de nutrientes debido a la erosión hídrica y eólica. En consecuencia, los suelos de montaña suelen ser menos productivos y más vulnerables que los de las tierras bajas (FAO, 2015a).

Las montañas tienen características distintivas que afectan al desarrollo de la agricultura, como laderas empinadas e inclinadas y crestas y picos afilados o redondeados. Las zonas de cultivo suelen ser pequeñas y el uso de la mecanización es limitado. Numerosos agricultores de montaña han abandonado los sistemas agrícolas tradicionales y dependen cada vez más de los cultivos comerciales para su subsistencia (FAO, 2019). Las condiciones climáticas debidas a la elevación varían significativamente, con grandes fluctuaciones de temperatura diarias y estacionales. El crecimiento de los cultivos es más lento debido a las temperaturas más bajas a gran altitud, y los agricultores suelen recoger una cosecha al año (FAO, 2015b).

¹¹ Pequeños agricultores, pastores, silvicultores y pescadores que gestionan superficies que oscilan entre menos de 1 y 10 ha. Los pequeños agricultores centran su negocio en la familia: a este respecto, apuntan a fomentar la estabilidad de su explotación agrícola, utilizar principalmente mano de obra de miembros de la familia para la producción y destinar parte de la producción al consumo familiar.

• • •
**El cultivo
en terrazas
se practica
ampliamente en
las laderas de las
montañas de todo
el mundo**

Las comunidades de montaña conservan muchas de las variedades de cultivos y plantas medicinales más raras. Han desarrollado valiosos conocimientos y técnicas tradicionales de cultivo, producción ganadera y captación de agua que contribuyen a mantener ecosistemas enteros (Romeo et al., 2020).

Sistemas de producción agrícola de regadío y de secano

La agricultura de regadío se practica normalmente en zonas áridas y semiáridas de montaña, con precipitaciones anuales inferiores a 350 mm. Las fuentes de agua para el riego incluyen pozos artesianos profundos, agua de río, agua almacenada localmente y agua de lluvia recogida en captaciones. Los agricultores que utilizan sistemas de regadío tienden a diversificar la producción para garantizar la seguridad alimentaria, incluyendo cultivos de alto valor, hortalizas, árboles frutales y plantas ornamentales. También se cultivan productos agrícolas como arroz, trigo y maíz (FAO, 2022).

En las montañas, la agricultura de secano se practica cuando las lluvias superan los 400 mm durante la estación húmeda. Suele utilizarse como enfoque de agricultura de conservación e implica un uso mínimo del suelo o labranza cero, retención de rastrojos y rotación de cultivos. Los cultivos de secano incluyen: cereales como cebada, maíz, arroz y trigo; legumbres como garbanzos, guisantes y lentejas; y cultivos hortícolas como árboles frutales, uvas, hortalizas y plantas medicinales (FAO, 2019; 2022).

El cultivo en terrazas en zonas de montaña

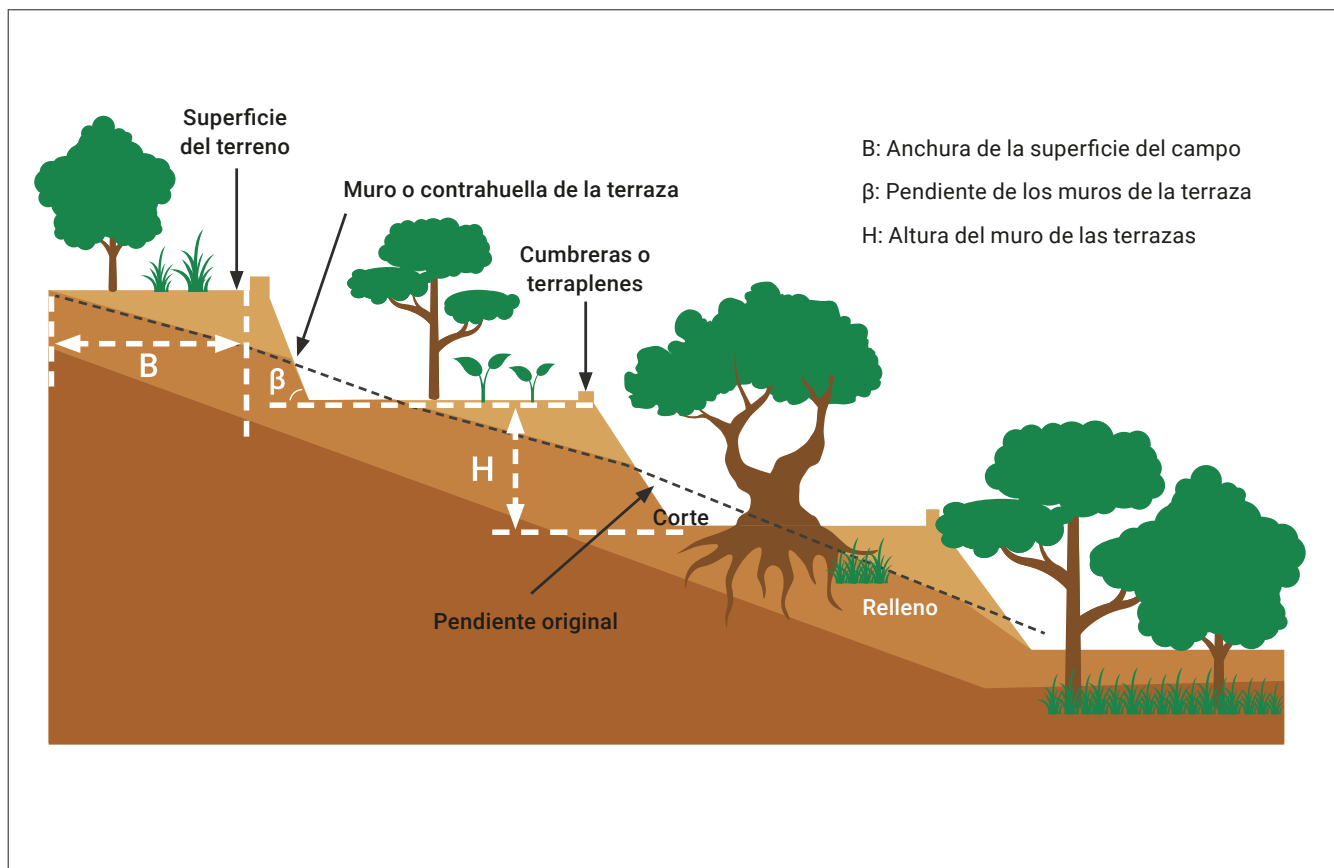
El cultivo en terrazas se practica ampliamente en las laderas de las montañas de todo el mundo (Chapagain y Raizada, 2017; FAO, 2022). Es una importante fuente de producción de alimentos y de generación de ingresos para los pequeños agricultores. Se practica desde hace miles de años, remontándose al siglo V a.C. en China y Yemen (FAO, 2019).

El cultivo en terrazas se adapta de forma innovadora a las condiciones locales de pendiente. Se realizan cortes y rellenos de tierra a lo largo de la pendiente de la ladera (figura 3.1), mientras que la tierra cultivable se amplía construyendo zonas de relleno. La anchura de una terraza depende de la inclinación de la pendiente: cuanto más pronunciada sea la pendiente, más estrecha será la terraza y más alto el muro. Las crestas o terraplenes desempeñan un papel importante en la interceptación de la escorrentía (Deng et al., 2021).

Una explotación en terrazas adecuadamente diseñada, construida y mantenida ofrece numerosos beneficios (FAO, 2019). Entre ellos se incluyen la reducción de la escorrentía de aguas superficiales y la promoción de la conservación del agua, la reducción de la erosión del suelo, la estabilización de laderas, la mejora de hábitats y biodiversidad, y el mantenimiento del patrimonio cultural (cuadro 3.2; Deng et al., 2021).

El cultivo en terrazas permite obtener numerosos productos. Entre ellos se incluyen cultivos de campo y hortícolas, forrajes y otros cultivos que requieren prácticas de gestión específicas (por ejemplo, riego), así como sistemas agroforestales y acuicultura. La mayoría de las explotaciones en terrazas son de secano. Como resultado, muchas terrazas no son tan productivas como las explotaciones que cuentan con mecanización y riego adecuados (Chapagain y Raizada, 2017).

Figura 3.1 Diagrama seccional de una ladera con terrazas



Fuente: basado en Deng et al. (2021, fig. 1, p. 345).

● ● ●
El cultivo insostenible de árboles puede provocar un aumento de la erosión del suelo y una reducción de la infiltración de agua

Uno de los retos de este tipo de cultivo es el riesgo de derrumbe de las terrazas: cuanto más alto es el muro de la terraza, mayor es el riesgo de colapso. Otros retos que limitan la producción son: terrenos estrechos y limitados para el cultivo; importantes necesidades de mano de obra; dificultades en el uso de la mecanización más allá de las herramientas tradicionales; y escaso acceso a insumos, mercados y servicios agrícolas (Deng et al., 2021). La mayoría de las explotaciones en terrazas se gestionan de forma tradicional con herramientas sencillas, una fuerza de tiro animal limitada y una mano de obra doméstica relativamente abundante. No obstante, una pequeña proporción de explotaciones en terrazas ha pasado de las técnicas antiguas a las modernas (FAO, 2019).

Sistemas de producción ganadera pastorales y agropastorales

En los sistemas pastorales el ganado se alimenta de vegetación de secano, como pastos, leguminosas, arbustos y otra vegetación natural que proporciona forraje. Esta práctica sigue siendo habitual en muchas zonas montañosas y de gran altitud, como en la estepa tibetana situada a más de 4 000 m sobre el nivel del mar (Sheehy et al., 2006). El pastoreo excesivo puede causar la degradación de los pastizales, la erosión del suelo y la pérdida de biodiversidad. Los sistemas agropastorales integran la producción de diferentes tipos de ganado, pastos naturales y diversos cultivos de campo como cebada, forraje, arbustos y árboles (FAO, 2022).

Cuadro 3.2 El sistema de terrazas de arroz de Honghe Hani

El sistema de terrazas arroceras de Honghe Hani, con una superficie de unas 70 000 ha, está situado en la provincia china de Yunnan, en la ladera sur de la montaña Honghe Ailao. Se ha construido un complejo sistema de canales para desviar las aguas de las cumbres boscosas a las terrazas de arroz. Dicho sistema proporciona múltiples bienes y servicios para los medios de vida locales, contribuyendo a satisfacer las necesidades de alimentos y combustible, al tiempo que fomenta la conservación ecológica y preserva las prácticas culturales locales (FAO, 2019). El sistema promueve los cultivos alimentarios tradicionales y la diversidad agrícola: de hecho, en la zona se cultivan 195 variedades de arroz, incluidas 48 variedades de arroz local. Sin embargo, las prácticas de cultivo de alto rendimiento y de variedades uniformes, además de aumentar el turismo, están amenazando el equilibrio del sistema de terrazas arroceras de Honghe Hani (Yang et al., 2017).



Sistema de terrazas de arroz de Honghe Hani en la provincia china de Yunnan

Foto: © FAO/Min Qingwen*.

El sistema de terrazas de arroz de Honghe Hani fue designado Sistema Importante del Patrimonio Agrícola Mundial (SIPAM) en 2010, siendo un sistema de “bosque-pueblo-terrace-agua-cultura”. Los SIPAM se definen como sistemas notables de uso de la tierra y paisajes ricos en diversidad biológica de importancia mundial, que evolucionan a partir de la adaptación de una comunidad a su entorno (FAO, 2019). La iniciativa tiene como objetivo establecer una base para el reconocimiento internacional, la conservación dinámica y la gestión sostenible de dichos sistemas. Las funciones de los SIPAM con respecto a la agricultura incluyen los medios de vida, la conservación del paisaje y de la agrobiodiversidad, los conocimientos tradicionales y los servicios ecosistémicos.

La iniciativa SIPAM se puso en marcha en 2002 y se convirtió en un programa oficial de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura en 2015. En 2024, 89 lugares de 28 países habían recibido este reconocimiento mundial (FAO, 2024). Los SIPAM son ejemplos vivos de prácticas agrícolas sostenibles, que contribuyen a promover la seguridad alimentaria y de los medios de vida de las comunidades rurales a pequeña escala, al tiempo que conservan las culturas y los conocimientos tradicionales y fomentan la resiliencia (FAO, 2019). Un alto porcentaje de los sitios SIPAM se encuentran en las montañas, donde se utilizan herramientas y métodos tradicionales practicados durante siglos.

● ● ●
**A escala mundial,
las aguas de
las montañas
contribuye en gran
medida a apoyar
el riego en las
tierras bajas**

3.2 Desafíos

Sistemas de producción forestal y agroforestal

Los sistemas forestales y agroforestales son importantes fuentes de sustento en las montañas, ya que proporcionan bienes y servicios medioambientales esenciales como madera, leña, almacenamiento de carbono y otros productos que mejoran la vida de las personas que viven en las montañas (véase el capítulo 6). Se calcula que los bosques cubren el 40 % de las zonas montañosas y cumplen una función protectora frente a los riesgos naturales, ya que estabilizan las pendientes pronunciadas, regulan los flujos de agua subterránea, reducen la escorrentía superficial y la erosión del suelo, y mitigan la posibilidad de que se produzcan corrimientos de tierras e inundaciones. El cultivo insostenible de árboles puede provocar un aumento de la erosión del suelo y una reducción de la infiltración de agua (Romeo et al., 2021; FAO, 2022).

Acuicultura y pesca en agua dulce

En las zonas montañosas sin litoral y sin acceso a recursos pesqueros marinos, el pescado de lagos, ríos y embalses es una fuente importante de proteínas animales, a menudo de forma estacional (Petr y Swar, 2002; Alpiev et al., 2013). La pesca en las montañas es de escala relativamente pequeña (FAO, 2003), por lo que los sistemas integrados de agricultura-acuicultura pueden ser especialmente importantes en estas zonas. Por ejemplo, la piscicultura en terrazas arroceras de montaña optimiza la productividad de la tierra, la rentabilidad y la sostenibilidad. Los peces mejoran la fertilidad del suelo aumentando la disponibilidad de oxígeno y depositando nitrógeno y fósforo. Además, influyen en la presencia de plagas del arroz, ya que regulan la proliferación de las malas hierbas acuáticas y las algas que actúan como huéspedes de las plagas en competencia con el arroz por los nutrientes. A cambio, el cultivo del arroz proporciona a los peces alimento planctónico, perifítico y bentónico. La temperatura del agua también se mantiene gracias al efecto sombreador del arroz, lo que permite a los peces prosperar durante los calurosos meses de verano (Chapagain y Raizada, 2017).

3.1.3 Dependencia aguas abajo de las aguas de las montañas para la agricultura (de regadío)

A escala mundial, las aguas de las montañas contribuye en gran medida a apoyar el riego en las tierras bajas. Se ha estimado que su contribución varía según las distintas cuencas fluviales y regiones (Viviroli et al., 2020). Por ejemplo, algunas zonas de la cuenca del Indo dependen especialmente de las aguas de montaña, incluido el deshielo de la criosfera, para sustentar las actividades de riego de las tierras bajas en la estación seca (Biemans et al., 2019). La contribución de las aguas de montaña al riego es relativamente más importante en las cuencas con limitados recursos alternativos (Viviroli et al., 2020).

En zonas de alta montaña como en el Afganistán, en la India y en el Pakistán, la nieve y el agua de deshielo de los glaciares se utilizan para el riego y ayudan a retener la humedad del suelo en pastos y praderas (Rasul y Molden, 2019).

3.2.1 Impactos del deshielo de la criosfera inducidos por el clima

Los cambios en la tasa de fusión de los glaciares y la nieve afectan al calendario y al volumen de la escorrentía y, por tanto, a su disponibilidad para la agricultura de regadío. Esto es de vital importancia para la producción agrícola tanto en las montañas como en las tierras bajas aguas abajo (Milner et al., 2017; Hock et al., 2019). Los altos niveles de pobreza e inseguridad

● ● ●
La reducción de las capas de nieve también puede afectar a la agricultura a través de efectos directos sobre la humedad del suelo

alimentaria en algunas comunidades de montaña contribuyen a la vulnerabilidad de las mismas a los impactos de estos cambios de la criosfera en la agricultura (Adler et al., 2022). Este fenómeno se ha observado, por ejemplo, en la región del HKH (McDowell et al., 2019; Rasul y Molden, 2019).

En las cuencas y ríos alimentados por glaciares, se ha observado un cambio en el calendario hacia un pico más temprano de fusión de la nieve en primavera. Esto plantea problemas a los agricultores a la hora de predecir con exactitud el momento de la entrada de agua en los sistemas de riego y de gestionar los calendarios de siembra de los cultivos de primavera. El deshielo de los glaciares y la escorrentía son mayores en verano y durante el día, cuando las temperaturas del aire y la radiación solar son más elevadas. En determinadas cuencas dependientes del balance de masas glaciares y de las condiciones hidrológicas locales, un deshielo y una escorrentía estivales mayores pueden beneficiar a los agricultores gracias a una mayor disponibilidad de agua para el riego en la estación seca. Sin embargo, existen riesgos asociados de inundaciones locales debido al agua de deshielo estival adicional (Hock et al., 2019).

Con el tiempo, a medida que la masa glaciar se reduce, la escorrentía anual aumenta inicialmente en las cuencas y ríos alimentados por glaciares. Tras algunos años o décadas, se alcanza un punto determinado, conocido como pico hídrico (véase el cuadro 2.2), tras el cual la escorrentía del agua de deshielo de los glaciares disminuye a medida que se reduce la masa glaciar, lo que puede provocar una menor disponibilidad de agua para riego y agricultura. Existe evidencia sólida de que el pico hídrico ya se ha superado en los ríos alimentados por glaciares de los Andes tropicales, de la parte occidental del Canadá y de los Alpes suizos (Hock et al., 2019). No se han explorado ni el nivel ni el momento del aumento del agua de deshielo de los glaciares en la región ampliada del HKH (Wester et al., 2019).

Impactos del derretimiento de la criosfera en la agricultura en las zonas montañosas
Agricultura de regadío y de secano

Existe cierta evidencia de que la disminución del caudal fluvial debido al derretimiento de los glaciares o la reducción de la cubierta de nieve ha llevado a una menor disponibilidad de agua para el riego de cultivos; por consiguiente, los rendimientos agrícolas han disminuido en varias localidades montañosas (Hock et al., 2019). Este fenómeno se ha observado en los Andes peruanos, que han experimentado una escorrentía estacional reducida debido al retroceso de los glaciares, lo que afecta negativamente a los cultivos (Bury et al., 2011), y en las montañas Karakoram en el Pakistán, que tienen una disponibilidad de agua estacional reducida para cultivos de regadío debido al retroceso de los glaciares y la reducción de la cubierta de nieve (Nüsser y Schmidt, 2017; Nüsser et al., 2019). Por el contrario, se ha observado un aumento en la disponibilidad de agua para riego que conduce a mayores rendimientos agrícolas en los Andes meridionales, debido al aumento del agua de deshielo como resultado del retroceso de los glaciares (Young et al., 2010).

La reducción de las capas de nieve también puede afectar a la agricultura a través de efectos directos sobre la humedad del suelo. Las comunidades rurales dependen de niveles adecuados de humedad del suelo al momento de la siembra, a menudo derivados de actividades de riego sustentadas por el deshielo de los glaciares y la nieve (Hock et al., 2019). Esta reducción de la cobertura de nieve se ha reportado en Nepal, donde dicho fenómeno ha provocado la desecación del suelo y una menor producción de patatas y forrajes (Smadja et al., 2015).

Pastoralismo

Los cambios en la temperatura y los regímenes hídricos pueden afectar el pastoreo en las zonas montañosas (Hock et al., 2019). “Los cambios relacionados con la nieve y los glaciares afectan negativamente a los pastores en sus residencias de verano y campamentos de invierno en el Himalaya (Namgay et al., 2014) y en las montañas escandinavas (Mallory y Boyce, 2018). La reducción de las nevadas invernales ha provocado una peor calidad de los pastos [para el ganado] en Nepal (Gentle y Maraseni, 2012) e India (Ingty, 2017). [...] Los pastores de Nepal informaron sobre la escasez de agua en las fuentes tradicionales a lo largo de las rutas migratorias (Gentle y Thwaites, 2016). El aumento del agua de deshielo de los glaciares ha provocado el aumento del tamaño de los lagos en la meseta tibetana, cubriendo zonas de pastoreo y obligando a los pastores a modificar sus patrones de desplazamiento estacional (Nyima y Hopping, 2019). Sin embargo, el aumento de las temperaturas, con sus efectos en la capa de nieve, tiene algunos efectos positivos. La migración estacional [...] comienza antes en el norte de Pakistán, y la estancia en los pastos de verano es más prolongada (Joshi et al., 2013), al igual que en Afganistán (Shaoliang et al., 2012)” (Hock et al., 2019, p. 172).

Impactos del derretimiento de la criosfera en la agricultura en las cuencas fluviales aguas abajo

El agua de deshielo de los glaciares constituye una importante fuente de agua durante la estación seca para el riego estival en las tierras bajas río abajo. Puede reducir la variabilidad de la escurrimiento fluvial de un año a otro, en algunos casos a distancias de cientos de kilómetros (Hock et al., 2019).

Se calcula que las zonas agrícolas de tierras bajas que reciben agua de riego de ríos alimentados por el deshielo de glaciares y nieves enfrentarán impactos negativos en algunas regiones, debido a la reducción del deshielo y la escurrimiento a medida que la masa glacial y la cubierta de nieve disminuyen con el tiempo (Hock et al., 2019; Viviroli et al., 2020). Por ejemplo, los sistemas fluviales que se originan en la región del HKH, como el río Indo, dependen significativamente del agua de deshielo de glaciares y nieves para el riego en la estación seca premonzónica, y son particularmente vulnerables a la reducción del deshielo a medida que la masa glacial y la cubierta de nieve disminuyen con el tiempo (Biemans et al., 2019; Nie et al., 2021; Lutz et al., 2022; Molden et al., 2022; cuadro 3.3). Además, se prevé que los cambios que afectan la primera fase del deshielo primaveral y el pico de fusión del agua de nieve alteren el momento de la escurrimiento para el riego río abajo en la región del HKH y Asia Central (Hock et al., 2019); en esta última zona, el fenómeno impacta, por ejemplo, en la capa de nieve y los glaciares de las montañas de Tien Shan (Xenarios et al., 2018).

3.2.2 Otros impactos inducidos por el clima

La agricultura de regadío y la agricultura de secano se ven afectadas por la creciente variabilidad de las precipitaciones estacionales y anuales, lo que plantea problemas a los agricultores a la hora de predecir con precisión los calendarios de siembra y la gestión del agua para los cultivos. El aumento de la temperatura del aire provoca una mayor evapotranspiración de los cultivos, que necesitan de más agua para mantener un rendimiento óptimo. La variabilidad de las precipitaciones y la nieve, que en algunos casos provoca sequías, ha afectado el crecimiento de la vegetación de los pastos y pastizales, impactando negativamente al ganado y a los medios de vida de los pastores (Hock et al., 2019). Por ejemplo, los pastores del Afganistán, Nepal y del Pakistán han percibido que los patrones erráticos de las nevadas y la disminución de las precipitaciones dieron lugar a una vegetación de menor calidad y cantidad (Gentle y Thwaites, 2016).

Cuadro 3.3 Dependencia de la cuenca indogangética del agua de deshielo de la criosfera para el riego

En la cuenca del río Indo, durante la temporada premonzónica, hasta el 60 % del total de las extracciones para riego proviene del deshielo de los glaciares y la nieve de las montañas, lo que contribuye a un aumento del 11 % de la producción agrícola total. En algunas zonas irrigadas de la cuenca baja del Indo, más del 50 % de la producción de arroz y algodón se puede atribuir al deshielo de los glaciares y la nieve. Si bien la dependencia en las llanuras aluviales del Ganges es comparativamente menor, el agua de deshielo sigue siendo esencial durante la estación seca, en particular para cultivos como el arroz y la caña de azúcar. Según datos de 1981 a 2010, se estima que 129 millones de agricultores de las cuencas del Indo y el Ganges dependen sustancialmente del deshielo de los glaciares y la nieve para su sustento. Este deshielo proporciona suficiente agua para cultivar alimentos que sustentan la dieta de aproximadamente 38 millones de personas.

Fuente: Biemans et al. (2019).

• • •
Los desastres relacionados con el clima han provocado la emigración, con efectos negativos indirectos sobre la mano de obra para la agricultura

Los desastres causados por riesgos naturales —como los debidos a precipitaciones erráticas e intensas, inundaciones, sequías y deslizamientos de tierra— han afectado negativamente al suministro estable y al transporte de productos agrícolas en zonas montañosas remotas, aumentando así la inseguridad alimentaria. Los desastres relacionados con el clima han provocado la emigración, con efectos negativos indirectos sobre la mano de obra para la agricultura, como se observó, por ejemplo, en Ghana, Tailandia, la República Unida de Tanzania y la región del HKH. Entre 2003 y 2013, en los países en desarrollo el sector agrícola se vio afectado por el 25 % de los riesgos relacionados con el clima, que causaron el 80 % de los daños y pérdidas del ganado y de la producción agrícola en las zonas montañosas (Romeo et al., 2020).

3.2.3 Desafíos adicionales

Acceso a los mercados de alimentos

Para los pequeños agricultores, lograr y mantener la seguridad alimentaria está relacionado con su capacidad de vender productos, acceder a las instalaciones del mercado y utilizarlas (Romeo et al., 2020). El tiempo de viaje a los mercados puede aumentar la vulnerabilidad de la población rural, al reducir su acceso a fuentes alternativas de alimentos y su capacidad para afrontar la escasez de comida. Los desafíos del transporte a los mercados de alimentos incluyen las condiciones de las carreteras, el terreno, los ríos navegables, los cursos de agua y las barreras naturales.

Acceso a infraestructura y servicios

La seguridad alimentaria a nivel familiar está determinada por factores como la educación, la salud, el género, los bienes y los gastos, así como por las condiciones regionales, como la infraestructura, los mercados y las instituciones propicias. Las comunidades de montaña que viven en zonas marginales suelen tener una capacidad limitada para desarrollar estrategias de adaptación ante crisis y emergencias, debido a niveles de ingresos relativamente bajos y al acceso restringido a medidas de apoyo y recursos externos (Romeo et al., 2020).

Degradación de la tierra y deforestación

La degradación del suelo en las montañas afecta negativamente la productividad agrícola, poniendo en peligro la sostenibilidad de la producción agrícola y la ganadería, y amenazando la seguridad hídrica (CNULD, 1994). En muchos países en desarrollo, el impacto de las prácticas agrícolas insostenibles en la degradación del suelo es elevado. En contextos

3.3 Respuestas

caracterizados por la expansión agrícola, la deforestación afecta negativamente la regulación de los flujos de agua hacia los acuíferos y los ríos, aumentando así la erosión del suelo y contribuyendo a incrementar la probabilidad de deslizamientos de tierra e inundaciones (FAO/PNUMA, 2023).

Riesgos

La frecuencia e intensidad de los riesgos y desastres naturales en las montañas ha aumentado en las últimas décadas. Inundaciones, flujos de detritos, deslizamientos de tierra y avalanchas son los riesgos que ocurren con más frecuencia y que afectan al mayor número de personas en las regiones montañosas. Por lo general, estos peligros tienen un impacto negativo general en las actividades agrícolas de los pequeños productores y la seguridad alimentaria (Adler et al., 2022). La migración y la disponibilidad de mano de obra para la agricultura también se ven afectadas por la incidencia de dichos peligros (Hock et al., 2019).

Las respuestas a los impactos del clima en las montañas varían significativamente en cuanto a objetivos y prioridades, velocidad de implementación, gobernanza y métodos de toma de decisiones, así como el alcance de los recursos financieros y de otro tipo para implementarlas (Adler et al., 2022). Las respuestas de adaptación suelen incluir cambios en las prácticas agrícolas, el desarrollo de infraestructuras, incluido el almacenamiento de agua, la aplicación de conocimientos indígenas, el desarrollo de capacidades a nivel comunitario y la adaptación basada en los ecosistemas (ABE; McDowell et al., 2021).

Las respuestas de adaptación observadas son en gran medida incrementales y se centran principalmente en sistemas de alerta temprana y la diversificación de las estrategias de subsistencia en la agricultura y el pastoreo a pequeña escala. Sin embargo, existe evidencia limitada sobre la viabilidad y la eficacia a largo plazo de estas medidas para abordar los impactos relacionados con el clima y las pérdidas y daños asociados (Hock et al., 2019; Adler et al., 2022).

3.3.1 Técnicas de adaptación climática en las montañas

Agricultura de regadío

Mejorar la infraestructura de almacenamiento de agua (en estado líquido) es una estrategia eficaz para mitigar la escasez de agua, especialmente en la estación seca. El tipo y la escala del almacenamiento varían según las características hidrológicas del sitio y los materiales disponibles. La infraestructura común de almacenamiento de agua en las montañas incluye estanques, tanques, diques de contención y embalses. Estos sistemas de almacenamiento ofrecen fuentes de agua viables para complementar los sistemas de riego en las regiones montañosas (Viviroli et al., 2011; Hock et al., 2019; Adler et al., 2022).

Los enfoques de adaptación para los sistemas de regadío incluyen: la adopción de nuevas tecnologías e infraestructuras de regadío, o la mejora de las infraestructuras existentes; la adopción de medidas de conservación del agua; el racionamiento del agua dentro del sistema; mejoras de la eficiencia; cambios en los patrones de cultivo. Todo puede promoverse a través de asociaciones de usuarios del agua específicas para las zonas de montaña (cuadro 3.4 ; Nüsser et al., 2019; Rasul et al., 2019; Rosa, 2022). Estos enfoques representan medidas de adaptación sólidas y poco arriesgadas (McDowell et al., 2019; Adler et al., 2022).

Cuadro 3.4 Medida de adaptación innovadora al derretimiento de los glaciares que afecta la disponibilidad de agua para la agricultura de regadío

En Ladakh, en la India septentrional, el almacenamiento de hielo desempeña desde hace tiempo un papel importante en el suministro de agua durante la temporada agrícola (Hasnain, 2012). Para afrontar la escasez estacional de agua en épocas críticas para el riego, la población de la región ha desarrollado cuatro tipos de depósitos de hielo: cuencas, cascadas, desviaciones y una forma conocida localmente como estupas de hielo. Estos depósitos de hielo captan agua en otoño e invierno, haciendo que se congele y reteniéndola hasta la primavera, cuando se derrite y fluye hacia los campos (Clouse et al., 2017; Nüsser et al., 2019). Retienen una parte no utilizada previamente del caudal anual y facilitan su uso para complementar el caudal en la primavera siguiente.

Entre los beneficios observados se encuentran el aumento de la frecuencia del riego, el rendimiento, la humedad del suelo y la recarga de acuíferos. Sin embargo, persisten dudas sobre la posible aplicación de esta estrategia de adaptación a largo plazo, ya que su funcionamiento depende de la escorrentía invernal y de los ciclos de hielo-deshielo, ambos sensibles a la variabilidad interanual. También plantea interrogantes sobre los costos financieros y los requisitos necesarios de la mano de obra, que varían según el tipo de depósito de hielo que se adopte entre los cuatro mencionados arriba.



Estupas de hielo en Ladakh, India

Fotografía: © Naveen Macro/Shutterstock*.

Fuente: adaptado de Hock et al. (2019, cuadro 2.3, p. 156).

Agricultura de secano

Los agricultores de montaña que practican la agricultura de secano han aprendido a adaptarse a las fluctuaciones de las precipitaciones y la disponibilidad de agua mediante diversas estrategias. Estas incluyen la adopción de prácticas agrícolas climáticamente inteligentes, la diversificación de cultivos, el uso de cultivos resistentes a la sequía, la conservación del suelo, la captación de agua, la construcción de estanques de conservación, el desarrollo de sistemas de alerta temprana de sequías y la aplicación de los conocimientos indígenas (Adhikari, 2018; Adler et al., 2022).

● ● ●
Los pueblos indígenas que viven en las montañas poseen conocimientos, únicos y valiosos que contribuyen a la consecución de sistemas alimentarios sostenibles, a la gestión de las tierras y a la preservación de la biodiversidad

Pastoralismo

Por lo que concierne al pastoralismo, las opciones de adaptación incluyen la migración estacional de los rebaños a pastos más fértiles, así como la utilización de planes de seguro ganadero, si existen (Fassio et al., 2014; Gentle y Thwaites, 2016; Tiwari et al., 2020).

Pesca en agua dulce

Los administradores pueden basarse en los niveles de prioridad de los lagos y las estrategias específicas de los ecosistemas para decidir dónde y cuándo aplicar medidas de gestión de las actividades pesqueras. Estas incluyen el uso de métodos tradicionales de repoblación, la prevención de la pérdida de hábitat acuático, el control de especies invasoras y la modificación de las prácticas de captura (FAO, 2003; Tingley et al., 2019).

Gestión de cuencas hidrográficas

Los enfoques de gestión de cuencas hidrográficas que tienen en cuenta las necesidades hídricas de la agricultura, abarcando componentes de los suelos, la biodiversidad, la silvicultura y los ecosistemas, fortalecerán la resiliencia general a los impactos del cambio climático, incluido el derretimiento de la criosfera (Adler et al., 2022; FAO, 2023). La reforestación constituye una práctica sostenible de uso del suelo que promueve la retención de agua en los suelos y las cuencas, aumentando así la disponibilidad de agua para la agricultura. Los suelos de montaña son particularmente vulnerables y sensibles a procesos de degradación como la erosión hídrica y la pérdida de calidad química y física (FAO, 2015b).

Riesgos

La mayoría de las respuestas de adaptación a los riesgos naturales en las regiones montañosas están pensadas para reaccionar a estímulos climáticos específicos o implican la recuperación posterior a desastres (McDowell et al., 2019). Se han empleado ampliamente medidas estructurales drásticas, como la construcción de diques, presas, embalses y terraplenes, para contener los peligros, junto con el uso de sistemas de alerta temprana, la zonificación y la gestión del territorio (Adler et al., 2022). La ABE se recomienda ampliamente para mitigar los riesgos de deslizamientos de tierra (p. ej., forestación, reforestación y mejora de la gestión forestal), inundaciones (p. ej., restauración y renaturalización de ríos) y sequías (p. ej., adaptación de cuencas hidrográficas; FAO, 2023). La experiencia de Nepal destaca que la introducción de la agroforestería en la agricultura de montaña promueve una reducción eficaz del riesgo de desastres (Schick et al., 2018).

3.3.2 Conocimientos y capacidades

Las redes de monitoreo hidrológico son extremadamente escasas en las regiones montañosas, especialmente en los países en desarrollo. La recopilación y el monitoreo de datos hidrológicos, a menudo inexistentes o limitados, influyen fuertemente en la posibilidad de predecir riesgos y de realizar evaluaciones hidrológicas precisas para la gestión del agua y la producción agrícola (Wilby, 2019; GEO Mountains, 2022). Se requieren urgentemente evaluaciones hidrológicas en muchas cordilleras del mundo, como en la región del HKH, donde las aguas de montaña sustentan los medios de vida agrícolas y cubren las necesidades de agua y energía de más de 2 000 millones de personas (Immerzeel et al., 2010; Wester et al., 2019). La ciencia ciudadana también tiene potencial para incrementar el monitoreo hidrológico en las montañas, por ejemplo involucrando a las poblaciones locales en la investigación y la recopilación de datos (Njue et al., 2019). Estas actividades representan una oportunidad para la recopilación de datos y la participación pública en proyectos relacionados con el agua (Hegarty et al., 2021).

Los pueblos indígenas que viven en las montañas poseen conocimientos, tradiciones y prácticas culturales locales únicos y valiosos que contribuyen a la consecución de sistemas alimentarios sostenibles, a la gestión de las tierras y a la preservación de la biodiversidad (FAO, 2021). Por ejemplo, en los Andes los conocimientos indígenas han promovido el acceso a redes locales y regionales de suministro de semillas y la adopción de nuevas variedades de cultivos (Skarbø y Van der Molen, 2014; cuadro 3.5).

3.3.3 Gobernanza

La Alianza para las Montañas es la única estructura de gobernanza global para las regiones montañosas. Esta alianza voluntaria, establecida por las Naciones Unidas en 2002, reúne a gobiernos, organizaciones intergubernamentales, organizaciones no gubernamentales y comunidades locales. Mediante la colaboración, el intercambio de conocimientos y la promoción, la Alianza para las Montañas aborda los desafíos que enfrentan los entornos y las comunidades de montaña, como por ejemplo la seguridad alimentaria y la nutrición.

Cuadro 3.5 Red Mundial de Sistemas de Garantía Participativa en las montañas

La Red Mundial de SPG en las montañas representa otro ejemplo válido de procesos de intercambio de conocimientos entre los pueblos de montaña, incluyendo también las comunidades indígenas. Creada en 2019 por 13 organizaciones de pequeños productores de montaña del Estado Plurinacional de Bolivia, de Filipinas, de la India, de Kirguistán, Mongolia, Nepal, Panamá y del Perú, la Red Mundial de SPG en las montañas es la primera red internacional de Sistemas de Garantía Participativa. [...] La red pone en contacto a los pequeños agricultores de montaña de todo el mundo, promueve el intercambio horizontal de conocimientos entre los socios y la innovadora cooperación Sur-Sur. Gracias a esta red, las experiencias de los agricultores de montaña pueden ser compartidas, comunicadas y ampliadas, manteniendo el enfoque específico del contexto típico de las iniciativas de SPG.

Fuente: extraído de FAO (2021, p. 99-100).

Este enfoque colaborativo para la gobernanza de las montañas permite a diversas partes interesadas trabajar juntas por un objetivo común: un futuro próspero para las personas y los lugares de montaña. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) alberga la Secretaría y es el organismo líder en materia de montañas dentro del sistema de las Naciones Unidas, ya que la agricultura y la producción alimentaria son actividades importantes en las zonas montañosas. El Quinquenio de Acción para el Desarrollo de las Regiones de Montaña (2023-2027) agrupa y guía las actividades para el desarrollo sostenible de las montañas. La Alianza para las Montañas lidera un compromiso de acción presentado en la Conferencia de las Naciones Unidas de 2023 sobre el Examen Amplio de Mitad de Período del Logro de los Objetivos del Decenio Internacional para la Acción "Agua para el Desarrollo Sostenible" (2018-2028), titulado "Avanzar en el desarrollo sostenible de las montañas y proteger las "torres de agua" del mundo".

A nivel regional, diversas organizaciones que se ocupan de las montañas abordan desafíos y oportunidades específicos en sus respectivas áreas (véase el capítulo 9). El Convenio de los Alpes y el Convenio de los Cárpatos se centran en el desarrollo sostenible y la conservación de las Cordilleras europeas de los Alpes y los Cárpatos respectivamente (Secretaría Permanente del Convenio de los Alpes, 2017). Por otro lado, el Centro Internacional para la Ordenación Integrada de las Montañas de la

3.4 Conclusiones

región de Hong Kong promueve la cooperación y el intercambio de conocimientos a nivel transfronterizo. La red del Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina trabaja en el desarrollo sostenible de la Cordillera de los Andes, centrándose en iniciativas comunitarias y el intercambio de conocimientos entre las naciones andinas.

La agricultura de montaña se enfrenta a numerosos obstáculos para garantizar la seguridad alimentaria mediante una producción sostenible y a una escala más amplia. El cambio climático, que afecta la variabilidad de las precipitaciones, junto con el calentamiento global, que provoca el deshielo de los glaciares y la nieve, afectará cada vez más la disponibilidad de agua en las montañas en diferentes escalas temporales, lo que plantea desafíos tanto para los agricultores de las montañas como para la agricultura de regadío río abajo. Además del aislamiento y la inaccesibilidad de las montañas, los impactos del cambio climático están agravando las dimensiones de la seguridad alimentaria: disponibilidad, accesibilidad, utilización y estabilidad.

Para crear un entorno propicio para la implementación de estrategias de adaptación, hay que tener en cuenta algunos factores importantes, como los que se enumeran a continuación: el desarrollo de capacidades y el fortalecimiento de la gestión del conocimiento, incluido un aumento en el monitoreo hidrológico y la generación de datos; el desarrollo de planes y políticas agrícolas que tengan plenamente en cuenta las necesidades específicas de las comunidades de montaña; el mejoramiento de las instituciones de gobernanza local, incluidas las organizaciones de agricultores; el apoyo a los sistemas agrícolas de montaña que preserven la diversidad agrícola; y el respaldo con fondos suficientes para la implementación de medidas de adaptación.

Una gobernanza eficaz para garantizar la seguridad alimentaria en las tierras altas y bajas es más necesaria que nunca. Hay que asegurarse que las montañas puedan proporcionar un caudal suficiente para el riego de las tierras bajas, así como preservar y valorar la singularidad y diversidad de los paisajes agrícolas de montaña.

Referencias

- Adhikari, S. 2018. Drought impact and adaptation strategies in the mid-hill farming system of western Nepal. *Environments*, Vol. 5, No. 9, Artículo 101. doi.org/10.3390/environments5090101.
- Adler, C., Wester, P., Bhatt, I., Huggel, C., Insarov, G., Morecroft, M., Muccione, V. y Prakash, A. 2022. Mountains. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem y B. Rama (eds), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribución del Grupo de Trabajo II al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge, Reino Unido/Nueva York, Cambridge University Press, pp. 2273-2318. doi.org/10.1017/9781009325844.022.
- Alpiev, M., Sarieva, M., Siriwardena, S. N., Valbo-Jørgensen, J. y Woynárovich, A. 2013. *Fish Species Introductions in the Kyrgyz Republic*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 584. Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). www.fao.org/4/i3268e/i3268e.pdf.
- Biemans, H., Siderius, C., Lutz, A. F., Nepal, S., Ahmad, B., Hassan, T., Von Bloh, W., Wijngaard, R. R., Wester, P., Shrestha, A. B. y Immerzeel, W. W. 2019. Importance of snow and glacier meltwater for agriculture on the Indo-Gangetic Plain. *Nature Sustainability*, Vol. 2, pp. 594-601. doi.org/10.1038/s41893-019-0305-3.
- Bury, J. T., Mark, B. G., McKenzie, J. M., French, A., Baraer, M., Huh, K. I., Zapata Luyo, M. A. y Gómez López, R. J. 2011. Glacier recession and human vulnerability in the Yanamarey watershed of the Cordillera Blanca, Peru. *Climatic Change*, Vol. 105, pp. 179-206. doi.org/10.1007/s10584-010-9870-1.
- Chapagain, T. y Raizada, M. N. 2017. Agronomic challenges and opportunities for smallholder terrace agriculture in developing countries. *Frontiers in Plant Science*, Vol. 8, Artículo 331. doi.org/10.3389/fpls.2017.00331.
- Clouse, C., Anderson, N. y Shippling, T. 2017. Ladakh's artificial glaciers: Climate-adaptive design for water scarcity. *Climate and Development*, Vol. 9, No. 5, pp. 428-438. doi.org/10.1080/17565529.2016.1167664.
- CLD (Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación). 1994. *United Nations Convention to Combat Desertification in Those Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification, Particularly in Africa*. París, CLD. catalogue.unccd.int/936_UNCCD_Convention_ENG.pdf.
- Deng, C., Zhang, G., Liu, Y., Nie, X., Li, Z., Liu, J. y Zhu, D. 2021. Advantages and disadvantages of terracing: A comprehensive review. *International Soil and Water Conservation Research*, Vol. 9, No. 3, pp. 344-359. doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.03.002.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 1996. *Rome Declaration on World Food Security*. Día Mundial de la Alimentación, Roma, 13-17 de noviembre de 1996. Roma, FAO. www.fao.org/4/w3613e/w3613e00.htm.
- . 2003. *Mountain Fisheries in Developing Countries*. Roma, FAO. www.fao.org/3/y4633e/y4633e.pdf.
- . 2014. *Desarrollo de cadenas de valor alimentarias sostenibles: Principios rectores*. Roma, FAO. openknowledge.fao.org/items/fb60cfb6-f445-4453-95f2-c37c234c37da.
- . 2015a. *Understanding Mountain Soils: A Contribution from Mountain Areas to the International Year of Soils 2015*. Roma, FAO. openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/8d557f4f-9458-4140-8f6b-42c9309ed060/content.
- . 2015b. *Mapping the Vulnerability of Mountain Peoples to Food Insecurity*. Roma, FAO. openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/fc51a31f-4d11-45da-a9f3-5d44277ab231/content.
- . 2019. *Mountain Agriculture: Opportunities for Harnessing Zero Hunger in Asia*. Bangkok, FAO. www.fao.org/3/ca5561en/ca5561en.pdf.
- . 2021. *Libro Blanco/Wiphala sobre sistemas alimentarios de los pueblos indígenas*. Roma, FAO. openknowledge.fao.org/items/90718c3a-4b0f-41ca-8dc6-3ec2721151fc.
- . 2022. El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura - Sistemas al límite. Informe desíntesis 2021. Roma. doi.org/10.4060/cb7654es.
- . 2023. *Building Resilience into Watersheds: A Sourcebook*. Roma, FAO. doi.org/10.4060/cc3258en.
- . 2024. Sistemas Importantes del Patrimonio Agrícola Mundial (SIPAM). El patrimonio agrícola en el mundo. Sitio web de la FAO. www.fao.org/giahs/around-the-world/es (consultado el 6 de noviembre de 2024).
- FAO/PNUMA (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura/Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). 2023. *Restoring Mountain Ecosystems: Challenges, Case Studies and Recommendations for Implementing the UN Decade Principles for Mountain Ecosystem Restoration*. Roma/Nairobi, FAO/PNUMA. doi.org/10.4060/cc9044en.
- Fassio, G., Battagliani, L. M., Porcellana, V. y Viazzo, P. P. 2014. The role of the family in mountain pastoralism: Change and continuity. *Mountain Research and Development*, Vol. 34, No. 4, pp. 336-343. doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-14-00019.1.
- Gentle, P. y Maraseni, T. N. 2012. Climate change, poverty and livelihoods: Adaptation practices by rural mountain communities in Nepal. *Environmental Science and Policy*, Vol. 21, pp. 24-34. doi.org/10.1016/j.envsci.2012.03.007.
- Gentle, P. y Thwaites, R. 2016. Transhumant pastoralism in the context of socioeconomic and climate change in the mountains of Nepal. *Mountain Research Development*, Vol. 36, No. 2, 173-182. doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-15-00011.1.
- GEO Mountains. 2022. *Mountain Observations: Monitoring, Data, and Information for Science, Policy, and Society*. Policy Brief. GEO Mountains. geomountains.org/images/GEO_Mountains_Policy_Brief_IYSMD_2022.pdf.
- Grupo del Banco Mundial. s.f. Qué es la seguridad alimentaria. Sitio web del Grupo del Banco Mundial. www.bancomundial.org/es/topic/agriculture/brief/food-security-update/what-is-food-security (consultado el 2 octubre de 2024).
- Hasnain, M. 2012. *Artificial Glaciers in Ladakh: A Socio-Economic Analysis*. Geres India. www.geres.eu/wp-content/uploads/2019/10/Artificial-glaciers-Socio-economic-analysis.pdf.
- Hegarty, S., Hayes, A., Regan, F., Bishop, I. y Clinton, R. 2021. Using citizen science to understand river water quality while filling data gaps to meet United Nations Sustainable Development Goal 6 objectives. *Science of the Total Environment*, Vol. 783, Artículo 146953. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146953.
- Hock, R., Rasul, G., Adler, C., Cáceres, B., Gruber, S., Hirabayashi, Y., Jackson, M., Käb, A., Kang, S., Milner, A., Molau, U., Morin, S., Orlove, B. y Steltzer, H. 2019. High mountain areas. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama y N. M. Weyer (eds), *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Reino Unido/Nueva York, Cambridge University Press, pp. 131-202. doi.org/10.1017/9781009157964.004.
- Immerzeel, W. W., Van Beek, L. P. H. y Bierkens, M. F. P. 2010. Climate change will affect the Asian water towers. *Science*, Vol. 328, No. 5984, pp. 1382-1385. doi.org/10.1126/science.1183188.

- Ingty, T. 2017. High mountain communities and climate change: Adaptation, traditional ecological knowledge, and institutions. *Climatic Change*, Vol. 145, No. 1-2, pp. 41-55. doi.org/10.1007/s10584-017-2080-3.
- Joshi, S., Jasra, W. A., Ismail, M., Shrestha, R. M., Yi, S. L. y Wu, N. 2013. Herders' perceptions of and responses to climate change in northern Pakistan. *Environmental Management*, Vol. 52, No. 3, pp. 639-648. doi.org/10.1007/s00267-013-0062-4.
- Lutz, A. F., Immerzeel, W. W., Siderius, C., Wijngaard, R. R., Nepal, S., Shrestha, A. B., Wester, P. y Biemans, H. 2022. South Asian agriculture increasingly dependent on meltwater and groundwater. *Nature Climate Change*, Vol. 12, pp. 566-573. doi.org/10.1038/s41558-022-01355-z.
- Mallory, C. D. y Boyce, M. S. 2018. Observed and predicted effects of climate change on Arctic caribou and reindeer. *Environmental Reviews*, Vol. 26, No. 1, pp. 13-25. doi.org/10.1139/er-2017-0032.
- McDowell, G., Huggel, C., Frey, H., Wang, F. M., Cramer, K. y Ricciardi, V. 2019. Adaptation action and research in glaciated mountain systems: Are they enough to meet the challenge of climate change? *Global Environmental Change*, Vol. 54, pp. 19-30. doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.10.012.
- McDowell, G., Stevens, M., Lesnikowski, A., Huggel, C., Harden, A., Di Bella, J., Morecroft, M., Kumar, P., Joe, E. T., Bhatt, I. D. y la Global Adaptation Mapping Initiative. 2021. Closing the adaptation gap in mountains. *Mountain Research and Development*, Vol. 41, No. 3, pp. A1-A10. doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-21-00033.1.
- Milner, A. M., Khamis, K., Battin, T. J., Brittain, J. E., Barrand, N. E., Füreder, L., Cauvy-Fraunié, S., Gíslason, G. M., Jacobsen, D., Hannah, D. M., Hodson, A. J., Hood, E., Lencioni, V., Ólafsson, J. S., Robinson, C. T., Tranter, M. y Brown, L. E. 2017. Glacier shrinkage driving global changes in downstream systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, Vol. 114, No. 37, pp. 9770-9778. doi.org/10.1073/pnas.1619807114.
- Molden, D. J., Shrestha, A. B., Immerzeel, W. W., Maharjan, A., Rasul, G., Wester, P., Wagle, N., Pradhananga, S. y Nepal, S. 2022. The great glacier and snow-dependent rivers of Asia and climate change: Heading for troubled waters. A. K. Biswas y C. Tortajada (eds), *Water Security Under Climate Change*. Water Resources Development and Management. Singapur, Springer, pp. 223-250. doi.org/10.1007/978-981-16-5493-0_12.
- Namgay, K., Millar, J. E., Black, R. S. y Samdup, T. 2014. Changes in transhumant agro-pastoralism in Bhutan: A disappearing livelihood? *Human Ecology*, Vol. 42, pp. 779-792. doi.org/10.1007/s10745-014-9684-2.
- Nie, Y., Pritchard, H. D., Liu, Q., Hennig, T., Wang, W., Wang, X., Liu, S., Nepal, S., Samyn, D., Hewitt, K. y Chen, X. 2021. Glacial change and hydrological implications in the Himalaya and Karakoram. *Nature Reviews Earth & Environment*, Vol. 2, pp. 91-106. doi.org/10.1038/s43017-020-00124-w.
- Njue, N., Stenfort Kroese, J., Gräf, J., Jacobs, S. R., Weeser, B., Breuer, L. y Rufino, M. C. 2019. Citizen science in hydrological monitoring and ecosystem services management: State of the art and future prospects. *Science of the Total Environment*, Vol. 693, Artículo 133531. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.337.
- Nüsser, M. y Schmidt, S. 2017. Nanga Parbat revisited: Evolution and dynamics of sociohydrological interactions in the Northwestern Himalaya. *Annals of the American Association of Geographers*, Vol. 107, No. 2, pp. 403-415. doi.org/10.1080/24694452.2016.1235495.
- Nüsser, M., Dame, J., Kraus, B., Baghel, R. y Schmidt, S. 2019. Socio-hydrology of "artificial glaciers" in Ladakh, India: Assessing adaptive strategies in a changing cryosphere. *Regional Environmental Changes*, Vol. 19, pp. 1327-1337. doi.org/10.1007/s10113-018-1372-0.
- Nyima, Y. y Hopping, K. A. 2019. Tibetan lake expansion from a pastoral perspective: Local observations and coping strategies for a changing environment. *Society and Natural Resources*, Vol. 32, No. 9, pp. 965-982. doi.org/10.1080/08941920.2019.1590667.
- Petr, T. y Swar, S. B. (eds). 2002. *Cold Water Fisheries in the Trans-Himalayan Countries*. FAO Fisheries Technical Paper No. 431. Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). openknowledge.fao.org/items/11b2bd1d-b9ef-49f1-9543-d59fd3c7c064.
- Rasul, G. y Molden, D. 2019. The global social and economic consequences of mountain cryospheric change. *Frontiers in Environmental Science*, Vol. 7, Artículo 91. doi.org/10.3389/fenvs.2019.00091.
- Rasul, G., Pasakhala, B., Mishra, A. y Pant, S. 2019. Adaptation to mountain cryosphere change: Issues and challenges. *Climate and Development*, Vol. 12, No. 4, pp. 297-309. doi.org/10.1080/17565529.2019.1617099.
- Romeo, R., Grita, F., Parisi, F. y Russo, L. 2020. *Vulnerability of Mountain Peoples to Food Insecurity: Updated Data and Analysis of Drivers*. Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)/Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CLD). doi.org/10.4060/cb2409en.
- Romeo, R., Manuelli, S. R., Geringer, M. y Barchiesi, V. (eds). 2021. *Mountain Farming Systems – Seeds for the Future: Sustainable Agricultural Practices for Resilient Mountain Livelihoods*. Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). doi.org/10.4060/cb5349en.
- Rosa, L. 2022. Adapting agriculture to climate change via sustainable irrigation: Biophysical potentials and feedbacks. *Environmental Research Letters*, Vol. 17, No. 6, Artículo 063008. doi.org/10.1088/1748-9326/ac7408.
- Schick, A., Wieners, E., Schwab, N. y Schickhoff, U. 2018. Sustainable disaster risk reduction in mountain agriculture: Agroforestry experiences in Kaule, mid-hills of Nepal. S. Mal, R. Singh y C. Huggel (eds), *Climate Change, Extreme Events and Disaster Risk Reduction: Towards Sustainable Development Goals*. Cham, Suiza, Springer, pp. 249-264. doi.org/10.1007/978-3-319-56469-2_17.
- Secretaría Permanente del Convenio de los Alpes. 2017. *Alpine Convention Mountain Agriculture Platform: Mountain Agriculture*. Alpine Signals No. 8. Secretaría Permanente del Convenio de los Alpes. www.alpconv.org/fileadmin/user_upload/downloads/downloads_en/2_organisation_en/organisation_presidency_en/mountain_agriculture_A4_EN.pdf.
- Shaoliang, Y., Ismail, M. y Zhaoli, Y. 2012. Pastoral communities' perspectives on climate change and their adaptation strategies in the Hindukush-Karakoram-Himalaya. H. Kreutzmann (ed.), *Pastoral Practices in High Asia: Agency of 'Development' Effected by Modernisation, Resettlement and Transformation*. Advances in Asian Human-Environmental Research. Dordrecht, Países Bajos (Reino de los), Springer. doi.org/10.1007/978-94-007-3846-1_17.
- Sheehy, D. P., Miller, D. y Johnson, D. A. 2006. Transformation of traditional pastoral livestock systems on the Tibetan steppe. *Sécheresse*, Vol. 17, No. 1-2, pp. 142-151.
- Skarbø, K. y Van der Molen, K. 2014. Irrigation access and vulnerability to climate-induced hydrological change in the Ecuadorian Andes. *Culture, Agriculture, Food and Environment*, Vol. 36, No. 1, pp. 28-44. doi.org/10.1111/cuag.12027.
- Smadja, J., Aubriot, O., Puschiasis, O., Duplan, T., Grimaldi, G., Hugonnet, M. y Buchheit, P. 2015. Climate change and water resources in the Himalayas: Field study in four geographic units of the Koshi basin, Nepal. *Journal of Alpine Research*, Vol. 103, No. 2. doi.org/10.4000/rga.2910.
- Tingley III, R. W., Paukert, C., Sass, G. G., Jacobson, P. C., Hansen, G. J. A., Lynch, A. J. y Shannon, P. D. 2019. Adapting to climate change: Guidance for the management of inland glacial lake fisheries. *Lake and Reservoir Management*, Vol. 35, No. 4, pp. 435-452. doi.org/10.1080/10402381.2019.1678535.
- Tiwari, K. R., Sitaula, B. K., Bajracharya, R. M., Raut, N., Bhusal, P. y Sengel, M. 2020. Vulnerability of pastoralism: A case study from the high mountains of Nepal. *Sustainability*, Vol. 12, No. 7, Artículo 2737. doi.org/10.3390/su12072737.

- Viviroli, D., Archer, D. R., Buytaert, W., Fowler, H. J., Greenwood, G. B., Hamlet, A. F., Huang, Y., Koboltschnig, G., Litaor, M. I., López-Moreno, J. I., Lorentz, S., Schädler, B., Schreier, H., Schwaiger, K., Vuille, M. y Woods, R. 2011. Climate change and mountain water resources: Overview and recommendations for research, management and policy. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 15, No. 2, pp. 471-504. doi.org/10.5194/hess-15-471-2011.
- Viviroli, D., Kummu, M., Meybeck, M., Kallio, M. y Wada, Y. 2020. Increasing dependence of lowland populations on mountain water resources. *Nature Sustainability*, Vol. 3, pp. 917-928. doi.org/10.1038/s41893-020-0559-9.
- Wester, P., Mishra, A., Mukherji, A. y Shrestha, A. B. (eds). 2019. *The Hindu Kush Himalaya Assessment: Mountains, Climate Change, Sustainability and People*. Cham, Suiza, Springer. lib.icimod.org/record/34383.
- Wilby, R. L. 2019. A global hydrology research agenda fit for the 2030s. *Hydrology Research*, Vol. 50, No. 6, pp. 1464-1480. doi.org/10.2166/nh.2019.100.
- Xenarios, S., Shenhav, R., Abdullaev, I. y Mastellari, A. 2018. Current and future challenges of water security in Central Asia. *Global Water Security: Lessons Learnt and Long-Term Implications*. Water Resources Development and Management. Singapur, Springer, pp. 117-142. doi.org/10.1007/978-981-10-7913-9_5.
- Yang, L., Liu, M., Lun, F., Yuan, Z., Zhang, Y. y Min, Q. 2017. An analysis on crops choice and its driving factors in agricultural heritage systems: A case of Honghe Hani rice terraces system. *Sustainability*, Vol. 9, No. 7, Artículo 1162. doi.org/10.3390/su9071162.
- Young, G., Zavala, H., Wandel, J., Smit, B., Salas, S., Jiménez, E., Fiebig, M., Espinoza, R., Díaz, H. y Cepeda, J. 2010. Vulnerability and adaptation in a dryland community of the Elqui Valley, Chile. *Climatic Change*, Vol. 98, pp. 245-276. doi.org/10.1007/s10584-009-9665-4.

Capítulo 4

Asentamientos humanos y reducción del riesgo de desastres

ONU-Hábitat

Hezekiah Pireh, Avi Sarkar, Sudha Shrestha y Shobana Srinivasan

Con contribuciones de: Nidhi Nagabhatla (UNU-CRIS), Sanae Okamoto y Serdar Turkeli (UNU-MERIT), Dipesh Chapagain y Navneet Kumar (UNU-EHS), Narayan Singh Khawas, Chicgoua Noubactep, Darren Saywell y Sean Furey (RWSN)

Las regiones montañosas son importantes torres de agua que sustentan asentamientos humanos donde vive el 14 % de la población mundial (Ehrlich et al., 2021). Estas regiones enfrentan un conjunto único de desafíos que afectan la prestación de servicios de agua, saneamiento e higiene (WASH; De Jong, 2015; Clerici et al., 2019; Zogaris et al., 2021). Con frecuencia están expuestas a riesgos naturales como inundaciones, deslizamientos de tierra provocados por lluvias extremas, flujos de escombros, avalanchas de hielo y nieve, terremotos y sequías.

Este capítulo se centra en los desafíos y las respuestas relativas a la prestación de servicios WASH y la reducción del riesgo de desastres (RRD) en las regiones montañosas. Destaca los impactos de la urbanización rápida y no planificada, los riesgos naturales y el cambio climático en la disponibilidad, calidad y seguridad del agua en dichas zonas.

4.1 Retos

4.1.1 Urbanización

La urbanización rápida y sin planificación en las regiones montañosas ejerce presión sobre los frágiles ecosistemas de montaña, afectando la disponibilidad, calidad y seguridad del agua. A pesar de los retos asociados con la topografía accidentada y la fragilidad de los ecosistemas, la población en las regiones montañosas ha experimentado un crecimiento constante. Entre 1975 y 2015, se duplicó la población del 35 % de las regiones montañosas aproximadamente (Thornton et al., 2022). Durante el mismo período, la proporción de población urbana concentrada en estas zonas oscilaba entre el 6 % y el 39 % (Ehrlich et al., 2021; Thornton et al., 2022).

Por lo tanto, comprender los modos de expansión específicos de las ciudades de montaña es esencial para la planificación sostenible, también por lo que concierne a la gestión de los recursos hídricos (Jia et al., 2020). Alrededor de 1 100 millones de personas viven en regiones montañosas. Si bien la tasa de urbanización varía considerablemente entre las cordilleras, aproximadamente el 34 % de la población de las montañas vive en grandes ciudades, el 31 % en ciudades menos pobladas y zonas semidensas, y el 35 % en zonas rurales. Aunque la tasa de urbanización en las montañas (66 %) es menor que en las tierras bajas (78 %), las cordilleras más pobladas y urbanizadas, como el Himalaya, los Andes, las Montañas Rocosas y los Alpes, también son aquellas donde las tasas de urbanización son más altas (Ehrlich et al., 2021).

La urbanización en las regiones montañosas tiene importantes impactos en el flujo de aguas superficiales y subterráneas (Somers y McKenzie, 2020), así como en la calidad del agua (De Jong, 2015). Altera significativamente el ciclo hidrológico, afectando el volumen y la calidad de las aguas superficiales. Las pendientes pronunciadas, la alteración de los patrones naturales de drenaje y las superficies pavimentadas disminuyen la recarga de aguas subterráneas y aumentan la escorrentía, lo que provoca inundaciones repentinas y erosión del suelo. La calidad del agua puede deteriorarse debido a los contaminantes provenientes del aumento del turismo, las aguas residuales sin tratar y las industrias. Los contaminantes heredados, como los contaminantes orgánicos persistentes, en particular los bifenilos policlorados y el diclorodifeniltricloroetano, los hidrocarburos aromáticos policíclicos y los metales pesados, pueden liberarse en las fuentes de agua debido al deshielo asociado al cambio climático (Hodson, 2014).

Por ejemplo, la región del Himalaya, en Asia Meridional, está densamente poblada y ha experimentado un rápido crecimiento urbano en las últimas décadas. Sin duda, la urbanización en la región ha creado empleos y mejorado la infraestructura, pero también ha causado importantes problemas ambientales y socioeconómicos. La alteración de

● ● ●
La urbanización rápida y sin planificación en las regiones montañosas ejerce presión sobre los frágiles ecosistemas de montaña

Cuadro 4.1 Impactos del desastre de las inundaciones de 2021 en Nepal

El 15 de junio de 2021, Melamchi Bazar, en Nepal, sufrió una devastadora inundación repentina causada por los ríos Melamchi e Indrawati, que causó 5 muertos, 20 desaparecidos y cuantiosos daños. El Proyecto de Agua Potable de Melamchi también se vio afectado. Este evento formó parte de una serie de inundaciones que, a lo largo de 3 o 4 días, dañaron 337 viviendas y desplazaron a 525 familias. Infraestructuras esenciales, como 13 puentes colgantes, 7 puentes transitables y numerosas carreteras, quedaron destruidas, lo que afectó gravemente a los asentamientos humanos, la agricultura y los medios de vida basados en los ríos en una extensa zona.

Las inundaciones también arrastraron grandes escombros río arriba, depositándolos hasta 54 km de distancia en Dolalghat. Además, el 18 de junio de 2021 un deslizamiento de tierra bloqueó el río Tama Koshi, formando un lago que amenazó las zonas río abajo. La Autoridad Nacional para la Reducción y Gestión del Riesgo de Desastres informó sobre las primeras víctimas y daños, y destacó la urgente necesidad de una gestión eficaz del riesgo de desastres.

Fuente: Maharjan et al. (2021).

los regímenes hidrológicos ha reducido la recarga de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua, lo que agrava la inseguridad hídrica ante los impactos del cambio climático. La deforestación, las pérdidas de biodiversidad y la probabilidad de riesgos naturales como inundaciones y deslizamientos de tierra han ido en aumento (Tiwari et al., 2018). La expansión urbana ha degradado ecosistemas frágiles, como bosques, hábitats de vida silvestre y fuentes de agua. Abordar estos desafíos requiere soluciones basadas en la naturaleza (SBN) y una planificación urbana específica para las zonas de montaña que garantice el desarrollo sostenible y la resiliencia.

4.1.2 Riesgos naturales

Los riesgos naturales como deslizamientos de tierra, terremotos, inundaciones, inundaciones por desbordamiento repentino de lagos glaciares y avalanchas ocurren con frecuencia en las regiones montañosas (véase la sección 2.2.3). Estos pueden dañar la infraestructura de abastecimiento de agua y saneamiento, e interrumpir el acceso a los servicios WASH. Por ejemplo, entre los años 850 y 2022, se registraron 3 151 inundaciones por desbordamiento repentino de lagos glaciares en las principales regiones glaciares del mundo (Lützow et al., 2023). Los daños a infraestructuras críticas como carreteras, puentes, presas, estructuras de toma de agua y protección contra inundaciones, centrales hidroeléctricas, líneas eléctricas y redes de comunicación han sido considerables. Estos peligros aumentan la vulnerabilidad de comunidades de montaña ya de por sí vulnerables y a menudo marginadas, y desestabilizan algunos de los sectores generadores de riqueza, como la agricultura, el turismo y la biodiversidad (Alfthan et al., 2018; Hock et al., 2019).

Por ejemplo, el terremoto de Nepal de abril de 2015 dañó las instalaciones de agua y saneamiento en las zonas circundantes: *“De un total de 11 288 sistemas de abastecimiento de agua en los 14 distritos más afectados, 1 570 sufrieron daños importantes, 3 663 resultaron parcialmente dañados y aproximadamente 220 000 servicios de saneamiento quedaron parcial o totalmente destruidos”* (ONU-Hábitat, 2016, p. 4). Como otro ejemplo, el cuadro 4.1 destaca los impactos del desastre de las inundaciones que ocurrieron en Nepal en 2021.

4.1.3 Cambio climático

Los hábitats montañosos son muy sensibles al cambio climático. El aumento de la frecuencia, la gravedad y la intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos puede provocar malas condiciones de vida y comprometer el acceso a servicios de agua y saneamiento (a menudo frágiles). El aumento de las temperaturas y la modificación de los patrones de precipitación debido al cambio climático pueden afectar la disponibilidad de agua en las regiones montañosas, incrementando la exposición a peligros como sequías e inundaciones (Adler et al., 2022).

Una mayor intensidad, frecuencia y duración de las precipitaciones extremas puede causar un aumento repentino del caudal máximo de los ríos, lo que provoca inundaciones inesperadas en los valles fluviales. En Nepal, un incremento de una unidad en la precipitación máxima diaria provocó un aumento del 33 % en las muertes por inundaciones; de la misma manera, un incremento de una unidad en el número de días de lluvia intensa y días húmedos consecutivos aumentó las muertes por deslizamientos de tierra



La deforestación, las pérdidas de biodiversidad y la probabilidad de riesgos naturales como inundaciones y deslizamientos de tierra han ido en aumento

en un 45 % y un 34 % respectivamente (Chapagain et al., 2024). Por el contrario, un déficit de precipitación, especialmente debido a la disminución de los días de lluvia dispersos y consecutivos de baja intensidad, reduce la percolación de agua hacia el subsuelo en zonas escarpadas. Esto afecta negativamente la recarga de aguas subterráneas y, posteriormente, disminuye las contribuciones del caudal base a los arroyos, manantiales naturales y almacenamiento en acuíferos (Chapagain et al., 2021; Seneviratne et al., 2021).

El aumento del estrés hídrico ha provocado migración y desplazamiento en las tierras altas (Joshi y Dongol, 2018; Almulhim et al., 2024). Durante las estaciones secas y cálidas, la escasez de agua conduce a malas prácticas de higiene y aumenta el riesgo de difusión de enfermedades (Dhimal et al., 2015; Bhandari et al., 2020). Además, la contaminación causada por un saneamiento deficiente, el agotamiento de las fuentes de agua, los incendios forestales, la minería y la agricultura no sostenible pueden afectar la disponibilidad y la calidad del agua.

Las regiones que dependen de la capa de nieve de las montañas como reserva de agua temporal también pueden experimentar sequías hidrológicas graves a medida que aumentan las temperaturas globales (Seneviratne et al., 2021).

4.1.4 Terrenos montañosos

Los terrenos montañosos —caracterizados por fuertes pendientes, condiciones climáticas a menudo difíciles, lugares remotos y redes de carreteras deficientes— plantean importantes retos para la construcción y el mantenimiento de infraestructuras de agua y saneamiento. La topografía de las regiones montañosas favorece la aparición natural o la construcción de embalses de agua a gran altura y sistemas de agua por gravedad, que pueden funcionar sin costosos requisitos energéticos. Sin embargo, construir y mantener depósitos de agua, plantas de tratamiento y tuberías de distribución puede resultar tedioso y caro. Para las comunidades a las que no llega el agua corriente, las pendientes pronunciadas y el terreno rocoso también limitan la disponibilidad de fuentes de agua superficiales, lo que hace que ir a buscar agua lleve mucho tiempo y sea físicamente demandante, especialmente para las mujeres y las niñas, que son culturalmente las principales proveedoras de agua para uso doméstico (Shrestha et al., 2019).

4.1.5 Salud mental y bienestar psicosocial

Los fenómenos meteorológicos extremos en las regiones montañosas pueden afectar significativamente a la salud, no solo en términos de lesiones físicas (Sumann et al., 2020), sino también de salud mental y bienestar psicosocial (Poudyal et al., 2021). Por ejemplo, las comunidades de la región del Hindu Kush Himalaya han sufrido los efectos del cambio climático, sobre todo en los últimos años. Las poblaciones locales del distrito de Ghizer, en la región de Gilgit-Baltisan, al norte del Pakistán, han sufrido inundaciones repentinas y corrimientos de tierra que han destruido las infraestructuras locales, las tierras agrícolas y las viviendas (Abbas y Khan, 2020).

Muchas comunidades de montaña que dependen de la agricultura, el turismo o la silvicultura son vulnerables a los efectos de los fenómenos meteorológicos extremos. La pérdida de los medios de subsistencia por los daños a cosechas, infraestructuras y actividades turísticas pueden conducir a la inestabilidad económica. Inevitablemente, estos fenómenos tienen un enorme impacto en la salud mental de las comunidades locales. Estas experiencias pueden causar estrés, ansiedad y trastorno de estrés postraumático entre las personas afectadas (OMS, 2022).

4.2 Respuestas

● ● ●
Es esencial invertir en infraestructuras resilientes al clima y en estrategias de adaptación basadas en la comunidad

Las poblaciones pueden mostrarse reticentes a hablar abiertamente de los problemas de salud mental por miedo al estigma social asociado a estas afecciones (Ebrahim, 2022). Además, las condiciones meteorológicas extremas pueden aislar a las comunidades al interrumpir las rutas y las redes de comunicación, lo que conduce a un acceso limitado o nulo a los servicios sanitarios y a los dedicados a la salud mental (Dewi et al., 2023). Este reto se ve agravado por las dificultades existentes para acceder a estos servicios debido a la lejanía geográfica o a la escasez de profesionales capacitados.

Mejorar el acceso a los servicios WASH y la RRD en las regiones montañosas requiere dar prioridad al agua en la planificación urbana e integrar servicios WASH y RRD en las contribuciones determinadas a nivel nacional (CDN) y los planes nacionales de adaptación (PNAD). Es esencial invertir en infraestructuras resilientes al clima y en estrategias de adaptación basadas en la comunidad, incluidos los conocimientos locales. Además, el fomento de la colaboración transfronteriza mejorará la resiliencia y ayudará a mitigar los efectos de los fenómenos meteorológicos extremos.

4.2.1 Planificación urbana y territorial

La urbanización en las regiones montañosas puede planificarse mejor si el sector WASH se sitúa en el centro de las estrategias de planificación urbana y territorial. Es necesario desarrollar y aplicar políticas eficaces de uso del suelo urbano para proteger y conservar el medio ambiente y los servicios ecosistémicos y para que los sistemas urbanos sean resilientes al clima (Tiwari et al., 2018).

Las prácticas de gestión sostenible de la tierra, como la reforestación y el pastoreo controlado, han ayudado a reducir la erosión del suelo y a mejorar la retención del agua, por ejemplo, en los Alpes. La gestión del suelo y los esfuerzos de reforestación reflejan la intención de estabilizar las laderas y aumentar la infiltración de la nieve fundida y el agua de lluvia, impulsando la recarga de las aguas subterráneas y reduciendo el riesgo de inundaciones repentinas (Repe et al., 2020).

4.2.2 Gestión de la reducción del riesgo de desastres

En las regiones montañosas, la RRD requiere una combinación de adaptación al cambio climático y mitigación de sus efectos, planificación estratégica urbana y territorial, uso de soluciones de ingeniería y desarrollo de sistemas de alerta temprana (SAT).

A través de la Nepal Karnali Water Activity, donantes como la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional han utilizado modelos hidrológicos como el Soil & Water Assessment Tool y el Water Accounting+ para evaluar el uso y la disponibilidad de recursos hídricos en la cuenca del río Karnali. Estas evaluaciones sirven de base a los planes locales de gestión de la RRD, orientando estrategias de mitigación y adaptación como la construcción de estanques, la conservación de manantiales, la forestación y la identificación de cultivos resistentes a las inundaciones y la sequía.

Integrar los esfuerzos relacionados con el cambio climático y las decisiones informadas en materia de planificación urbana es crucial para minimizar las vulnerabilidades, también en lo que respecta al suministro de agua, saneamiento

• • •
Las comunidades de las regiones montañosas se han basado en los conocimientos indígenas para aumentar la resiliencia frente a los retos relacionados con el agua y el saneamiento

e higiene. La colaboración en la investigación y la formulación de políticas es esencial para abordar los retos específicos de las regiones montañosas y proteger sus servicios ecosistémicos vitales. Iniciativas como la Global Mountain Safeguard Research y la Alianza para las Montañas tienen como objetivo fomentar comunidades de montaña sostenibles y resilientes, garantizando el bienestar social y económico al tiempo que se conservan los ecosistemas de montaña (FAO, 2022; UNU-EHS, 2023).

4.2.3 Financiar la adaptación y las infraestructuras resilientes al clima

La revisión de las CDN de los países¹² y los PNAD¹³ presentada a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático antes de junio de 2024 sugiere que el agua, el saneamiento y la higiene y la gestión de catástrofes son sectores prioritarios en los países montañosos en desarrollo. Entre los ejemplos de acciones de adaptación en las regiones montañosas se incluyen: estudios de viabilidad para construir zonas de almacenamiento y desviaciones de emergencia y controlar los vertidos de los lagos glaciares; planificación y gestión de cuencas fluviales para su optimización; seguimiento de los cambios de los glaciares a lo largo del tiempo y establecimiento de sistemas de reducción del riesgo de inundaciones por desbordamiento repentino de lagos glaciares y SAT en cuencas fluviales con áreas congeladas.

Las necesidades específicas de financiación para la adaptación de los países montañosos en desarrollo ascienden a 187 000 millones de dólares estadounidenses anuales (a precios de 2021), lo que equivale al 1,3 % de su producto interior bruto para esta década. Las necesidades de financiación para la adaptación en los sectores de la salud y el saneamiento, el abastecimiento de agua y la RRD representan en conjunto casi el 20 % de las necesidades totales de financiación para la adaptación de dichos países. Sin embargo, el flujo de financiación pública e internacional disponible para la adaptación en estos países en 2022 fue de solo 13 800 millones de dólares, lo que indica un gran déficit de financiación para la adaptación (véase el capítulo 9), que afecta a sectores como el suministro de agua, la RRD, la salud y el saneamiento en las regiones montañosas. A pesar de que existen enormes déficits en la financiación para la adaptación, estos sectores concentran conjuntamente casi el 30 % del flujo actual de financiación para la adaptación en los países montañosos en desarrollo (PNUMA, 2024).

Las infraestructuras resilientes al cambio climático, como los diques reforzados y los canales de desviación de crecidas, pueden proteger a las comunidades de montaña y a los usuarios aguas abajo de los efectos de los fenómenos meteorológicos extremos y los cambios en los patrones hidrológicos. El informe *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability* (IPCC, 2022) destaca que los proyectos de infraestructuras pueden diseñarse para resistir el aumento de la escorrentía provocada por el deshielo de la nieve y los glaciares, garantizando el suministro continuo de agua para uso urbano y agrícola.

El caso de las Montañas Rocosas ilustra la importancia de comprender los flujos hídricos estacionales (caudales de verano, otoño e invierno) para diseñar intervenciones eficaces en materia de servicios hídricos (Rood, 2008; IPCC, 2022).

El coste a corto plazo de las infraestructuras resilientes al cambio climático suele ser más elevado que el de las tecnologías convencionales. El coste adicional puede ser prohibitivo, lo que frena el desarrollo de tecnologías adecuadas. No se puede esperar que los mercados financieros absorban por sí solos este coste adicional, que debe ser

¹² unfccc.int/NDCREG.

¹³ napcentral.org/submitted-NAPs.

● ● ●
Los sistemas descentralizados de agua y saneamiento pueden ser especialmente eficaces en las regiones montañosas

asumido por el estado hasta que se alcance una masa crítica y se pueda reducir el coste de la tecnología. Los proveedores de servicios pueden necesitar apoyo para desarrollar soluciones tecnológicas manteniendo su viabilidad financiera.

4.2.4 Promover estrategias y acciones participativas y basadas en la comunidad

Las comunidades de las regiones montañosas se han basado en los conocimientos indígenas para aumentar la resiliencia frente a los retos relacionados con el agua y el saneamiento. Los avances en ingeniería civil han facilitado la aplicación de estos conocimientos, con la posibilidad de construir sistemas modulares como embalses y depósitos para el almacenamiento de agua. La instalación de infraestructuras de recogida de agua de lluvia en lugares con problemas de agua potable también puede beneficiar a las comunidades de montaña.

El uso de estrategias de adaptación basadas en la comunidad —en particular las que implican el reconocimiento de las voces de los pueblos indígenas— puede capacitar a las comunidades locales para participar en los procesos de toma de decisiones sobre la gestión del agua e incorporar los conocimientos locales y tradicionales en el diseño y la aplicación de soluciones adaptadas a sus necesidades específicas.

4.2.5 Gestión integrada de los recursos hídricos

Adaptar el proyecto de gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) al contexto local de las regiones montañosas puede ayudar a resolver algunos problemas relacionados con el agua, como el impacto de los cambios en la capa de nieve y el retroceso de los glaciares sobre la disponibilidad de agua (véase el cuadro 2.2). Por ejemplo, la mejora de la capacidad de almacenamiento de agua mediante la construcción de nuevos embalses y la restauración de los sistemas tradicionales de almacenamiento de agua, como estanques y depósitos, puede ayudar a amortiguar la variabilidad estacional del agua y mitigar los efectos de las crecidas repentinas. También es importante tener en cuenta las innovaciones tecnológicas, como el monitoreo eficiente de los glaciares y los sistemas de alerta temprana (véase el capítulo 8), que pueden proporcionar información esencial sobre el deshielo de los glaciares y las inundaciones por desbordamiento repentino de lagos glaciares (Taylor et al., 2023).

En algunos países andinos se han establecido sistemas de GIRH para vigilar el retroceso de los glaciares y la formación de lagos glaciares, proporcionando así a las comunidades alertas tempranas, reduciendo el riesgo de inundaciones repentinas y protegiendo vidas e infraestructuras de agua, saneamiento e higiene. En el Estado Plurinacional de Bolivia y el Perú se están llevando a cabo evaluaciones a nivel nacional del peligro y el riesgo de inundaciones por desbordamiento repentino de lagos glaciares para garantizar que la seguridad hídrica —incluidos los retos que plantean los servicios de abastecimiento— pueda abordarse junto con los impactos del cambio climático (Emmer et al., 2022).

4.2.6 Desarrollo de sistemas descentralizados de agua y saneamiento

Los sistemas descentralizados de agua y saneamiento pueden ser especialmente eficaces en las regiones montañosas (por ejemplo, en el cuadro 4.2), ya que reducen el riesgo de daños en las infraestructuras durante las catástrofes en terrenos escarpados sujetos a frecuentes corrimientos de tierra. Por ejemplo, en las regiones montañosas de la República Democrática Popular Lao y Nepal, las iniciativas dirigidas por la comunidad han establecido con éxito soluciones resilientes y sostenibles en materia de agua y saneamiento, demostrando la eficacia de los enfoques descentralizados en entornos difíciles (UICN, s.f.).

Cuadro 4.2 Sistema de abastecimiento de agua y saneamiento por gravedad basado en la comunidad

En el distrito de Xieng Ngeun, en la provincia de Luang Prabang, República Democrática Popular Lao, el 85 % de los hogares no tenía acceso a instalaciones de saneamiento básicas, y la infraestructura estaba inoperativa por abandono. Las personas que residían en las aldeas a menudo tenían que recorrer largas distancias para recoger agua, que con frecuencia estaba contaminada, lo que provocaba problemas de salud generalizados como la diarrea.

Para hacer frente a los problemas típicos de la mayoría de las zonas montañosas (pendientes pronunciadas, lejanía y escasa densidad de población), el Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos puso en marcha un proyecto piloto comunitario de agua, saneamiento e higiene (WASH) dirigido a 1 221 hogares de seis aldeas. Un componente clave de la iniciativa fue el desarrollo de un sistema de agua corriente alimentado por gravedad, que aprovechaba la topografía local para suministrar agua de forma eficiente sin necesidad de sistemas de bombeo de alto consumo energético. Este enfoque, junto con los fondos rotatorios para mejoras sanitarias gestionadas por la comunidad, permitió conectar a la red de abastecimiento de agua a más del 90 % de los hogares de las seis aldeas seleccionadas, frente al 0 % anterior. Se hizo hincapié en la participación de la comunidad y se formó a los residentes para proteger y mantener la infraestructura de abastecimiento de agua.

El proyecto también abordó varios retos persistentes. Por ejemplo, la ausencia de un sistema formal de drenaje era un problema importante para quienes residían en las zonas bajas propensas a las inundaciones. Además, la baja densidad de población complicaba los esfuerzos por lograr economías de escala en la prestación de servicios de agua, saneamiento e higiene, lo que hacía difícil justificar el coste de construcción y mantenimiento de infraestructuras extendidas a zonas escasamente pobladas en un terreno tan accidentado.

Con más del 80 % de los hogares conectados a la red de abastecimiento de agua y más del 90 % con acceso a saneamiento básico, el proyecto piloto de Xieng Ngeun demuestra el potencial de los enfoques basados en la comunidad para superar los singulares retos relacionados con el suministro de agua en las regiones montañosas.

Fuente: ONU-Hábitat (s.f.).

4.3 Conclusiones

Los múltiples retos a los que se enfrentan los asentamientos humanos en las regiones de montaña, especialmente en lo que respecta a la gestión de los recursos hídricos, el agua, el saneamiento y la higiene, la RRD y las cuestiones sanitarias, se ven agravados por la creciente frecuencia e intensidad de fenómenos meteorológicos extremos, como las inundaciones por desbordamiento repentino de lagos glaciares, los corrimientos de tierras y las inundaciones repentinas. Aunque es necesario examinar en qué medida se interrumpen los servicios de agua, saneamiento e higiene, la participación de las comunidades ha sido un factor que ha permitido reducir los riesgos para la salud pública en las comunidades montañosas vulnerables.

Las respuestas para mejorar el acceso a los servicios WASH y la RRD incluyen: priorizar el agua en la planificación urbana y territorial, así como los servicios WASH y la RRD en las CDN y los PNAD; invertir en infraestructuras resilientes al clima; y promover estrategias de adaptación basadas en la comunidad que reconozcan e incorporen el conocimiento local e indígena. Adaptar proyectos de GIRH al contexto local puede servir para abordar problemas como el impacto del retroceso de los glaciares en la disponibilidad de agua. La colaboración transfronteriza y el refuerzo de las medidas de RRD pueden ayudar a mitigar los efectos de los fenómenos extremos.

Las acciones políticas coordinadas para abordar estos retos apuntan a la GIRH como un marco de referencia que prioriza el equilibrio entre las necesidades sociales, económicas y medioambientales, incorporando conocimientos tradicionales y tecnologías modernas. El uso de sistemas descentralizados de agua y saneamiento puede aumentar la resiliencia y reducir los daños a las infraestructuras durante las catástrofes. Dichos sistemas empoderan a las comunidades locales mediante el desarrollo de capacidades y enfoques participativos, y garantizan que las estrategias en materia de agua, saneamiento e higiene sean culturalmente apropiadas y localmente relevantes, lo que resulta crucial para garantizar medidas de adaptación al clima y servicios de apoyo a la salud eficaces en áreas de gran altitud.

Este capítulo también reclama inversiones en infraestructuras resilientes a los riesgos relacionados con el agua y el clima, como terraplenes reforzados y canales de desviación de inundaciones, y la aplicación de SBN. Las estrategias de acción climática y seguridad hídrica para las comunidades vulnerables que viven en áreas de gran altitud deben integrar servicios de apoyo sanitario, incluidos sistemas de apoyo a la salud mental.

Referencias

- Abbas, S. y Khan, A. 2020. Socioeconomic impacts of natural disasters: Implication for flood risk measurement in Damas Valley, District Ghizer, Gilgit-Baltistan, Pakistan. *Pakistan Geographical Review*, Vol. 75. No. 1, pp. 71-83. www.researchgate.net/publication/343098654.
- Adler, C., Wester, P., Bhatt, I., Huggel, C., Insarov, G. E., Morecroft, M. D., Muccione, V. y Prakash, A. 2022. Mountains. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem y B. Rama (eds), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribución del Grupo de Trabajo II al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge, Reino Unido/Nueva York, Cambridge University Press, pp. 2273-2318. doi.org/10.1017/9781009325844.022.
- Alfthan, B., Gjerdi, H. L., Puikkonen, L., Andresen, M., Semernya, L., Schoolmeester, T. y Jurek, M. 2018. *Mountain Adaptation Outlook Series: Synthesis Report*. Nairobi/Viena/Arendal, Noruega, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA)/GRID-Arendal. gridarendal-website-live.s3.amazonaws.com/production/documents/s_document/412/original/SynthesisReport_screen.pdf?1544437610.
- Almulhim, A. I., Alverio, G. N., Sharifi, A., Shaw, R., Huq, S., Mahmud, M. J., Ahmad, S. y Abubakar, I. R. 2024. Climate-induced migration in the Global South: An in depth analysis. *npj Climate Action*, Vol. 3, Artículo 47. doi.org/10.1038/s44168-024-00133-1.
- Bhandari, D., Bi, P., Sherchand, J. B., Dhimal, M. y Hanson-Easey, S. 2020. Assessing the effect of climate factors on childhood diarrhoea burden in Kathmandu, Nepal. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, Vol. 223, No. 1, pp. 199-206. doi.org/10.1016/j.ijheh.2019.09.002.
- Chapagain, D., Dhaubanjar, S. y Bharati, L. 2021. Unpacking future climate extremes and their sectoral implications in western Nepal. *Climatic Change*, Vol. 168, Artículo 8. doi.org/10.1007/s10584-021-03216-8.
- Chapagain, D., Bharati, L., Mechler, R., Samir, K. C., Pflug, G. y Borgemeister, C. 2024. Understanding the role of climate change in disaster mortality: Empirical evidence from Nepal. *Climate Risk Management*, Vol. 46, Artículo 100669. doi.org/10.1016/j.crm.2024.100669.
- Clerici, N., Cote-Navarro, F., Escobedo, F. J., Rubiano, K. y Villegas, J. C. 2019. Spatio-temporal and cumulative effects of land use-land cover and climate change on two ecosystem services in the Colombian Andes. *Science of the Total Environment*, Vol. 685, pp. 1181-1192. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.275.
- De Jong, C. 2015. Challenges for mountain hydrology in the third millennium. *Frontiers in Environmental Science*, Vol. 3. doi.org/10.3389/fenvs.2015.00038.
- Dewi, S. P., Kasim, R., Sutarsa, I. N., Hunter, A. y Dykgraaf, S. H. 2023. Effects of climate-related risks and extreme events on health outcomes and health utilization of primary care in rural and remote areas: A scoping review. *Family Practice*, Vol. 40, No. 3, pp. 486-497. doi.org/10.1093/fampra/cm151.
- Dhimal, M., Ahrens, B. y Kuch, U. 2015. Climate change and spatiotemporal distributions of vector-borne diseases in Nepal: A systematic synthesis of literature. *PLoS ONE*, Vol. 10, Artículo e0129869. doi.org/10.1371/journal.pone.0129869.
- Ebrahim, Z. 2022. Climate Disasters Trigger Mental Health Crisis in Pakistan's Mountains. Sitio web de Dialogue Earth. dialogue.earth/en/climate/climate-disasters-trigger-mental-health-crisis-in-pakistans-mountains/.
- Ehrlich, D., Melchiorri, M. y Capitani, C. 2021. Population trends and urbanisation in mountain ranges of the world. *Land*, Vol. 10, No. 3, Artículo 255. doi.org/10.3390/land10030255.
- Emmer, A., Wood, J. L., Cook, S. J., Harrison, S., Wilson, R., Díaz-Moreno, A., Reynolds, J. M., Torres, J. C., Yarleque, C., Mergili, M., Jara, H. W., Bennett, G., Caballero, A., Glasser, N. F., Melgarejo, E., Riveros, C., Shannon, S., Turpo, E., Tinoco, T., Torres, L., Garay, D., Villafane, H., Garrido, H., Martínez, C., Apaza, N., Araujo, J. y Poma, C. 2022. 160 glacial lake outburst floods (GLOFs) across the Tropical Andes since the Little Ice Age. *Global and Planetary Change*, Vol. 208, Artículo 103722. doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103722.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2022. The Vision and Mission. Sitio web de la Alianza para las Montañas. www.fao.org/mountain-partnership/about/vision-and-mission/en#:~:text=By%202030%2C%20the%20Mountain%20Partnership,livelihood%20and%20well%2Dbeing%20of.

- Hock, R., Rasul, G., Adler, C., Cáceres, B., Gruber, S., Hirabayashi, Y., Jackson, M., Kääb, A., Kang, S., Kutuzov, S., Milner, A., Molau, U., Morin, S., Orlove, B. y Steltzer, H. 2019. High mountain areas. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama y N. M. Weyer (eds), *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Reino Unido/Nueva York, Cambridge University Press, pp. 131-202. doi.org/10.1017/9781009157964.004.
- Hodson, A. J. 2014. Understanding the dynamics of black carbon and associated contaminants in glacial systems. *Wiley Interdisciplinary Reviews (WIREs): Water*, Vol. 1, No. 2, pp. 141-149. doi.org/10.1002/wat2.1016.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2022. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribución del Grupo de Trabajo II al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem y B. Rama (eds)]. Cambridge, Reino Unido/Nueva York, Cambridge University Press. doi.org/10.1017/9781009325844.
- Jia, L., Ma, Q., Du, C., Hu, G. y Shang, C. 2020. Rapid urbanization in a mountainous landscape: Patterns, drivers, and planning implications. *Landscape Ecology*, Vol. 35, pp. 2449-2469. doi.org/10.1007/s10980-020-01056-y.
- Joshi, N. y Dongol, R. 2018. Severity of climate induced drought and its impact on migration: A study of Ramechhap District, Nepal. *Tropical Agricultural Research*, Vol. 29, No. 2, pp. 194-211.
- Lützw, N., Veh, G. y Korup, O. 2023. A global database of historic glacier lake outburst floods. *Earth System Science Data*, Vol. 15, No. 7, pp. 2983-3000. doi.org/10.5194/essd-15-2983-2023.
- Maharjan, S. B., Steiner, J. F., Shrestha, A. B., Maharjan, A., Nepal, S., Shrestha, M. S., Bajracharya, B., Rasul, G., Shrestha, M., Jackson, M. y Gupta, N. 2021. *The Melamchi Flood Disaster. Cascading Hazard and the Need for Multihazard Risk Management*. Katmandú, Centro Internacional para la Ordenación Integrada de las Montañas (ICIMOD). lib.icimod.org/record/35284.
- OMS (Organización Mundial de la Salud). 2022. *Mental Health and Climate Change: Policy Brief*. OMS. iris.who.int/handle/10665/354104.
- ONU-Hábitat (Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos). 2016. *Nepal Earthquake 2015: Reviving Sanitation Campaign*. Global Sanitation Fund Lessons. Katmandú, ONU-Hábitat. unhabitat.org/sites/default/files/documents/2019-05/gsf-021-eq-final.pdf.
- . s.f. *Proyecto Comunitario de agua y saneamiento en la ciudad de Xieng Ngeun, provincia de Luang Prabang, República Democrática Popular Lao. Iniciativa Agua y Saneamiento de la Región del Mekong*. ONU-Hábitat. unhabitat.la/projects/community-based-wash-project-xieng-ngeun/.
- PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). 2024. *Adaptation Gap Report 2024. Come Hell and High Water: As Fires and Floods Hit the Poor Hardest, it is Time for the World to Step Up Adaptation Actions*. Nairobi, PNUMA. doi.org/10.59117/20.500.11822/46497.
- Poudyal, N. C., Joshi, O., Hodges, D. G., Bhandari, H. y Bhattarai, P. 2021. Climate change, risk perception, and protection motivation among high-altitude residents of the Mt. Everest region in Nepal. *Ambio*, Vol. 50, pp. 505-518. doi.org/10.1007/s13280-020-01369-x.
- Repe, A. N., Poljanec, A. y Vrščaj, B. (eds). 2020. *Soil Management Practices in the Alps: A Selection of Good Practices for the Sustainable Soil Management in the Alps*. Liubliana, Espacio Alpino Interreg de la EU. www.alpine-space.eu/wp-content/uploads/2022/06/46-1-links4soils-Soil%20Management%20Practices%20in%20the%20Alps%20-%20a%20collection-output.pdf.
- Rood, S. B., Pan, J., Gill, K. M., Franks, C. G., Samuelson, G. M. y Shepherd, A. 2008. Declining summer flows of Rocky Mountain rivers: Changing seasonal hydrology and probable impacts on floodplain forests. *Journal of Hydrology*, Vol. 349, No. 3-4, pp. 397-410. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.11.012.
- Seneviratne, S. I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Di Luca, A., Ghosh, S., Iskandar, I., Kossin, J., Lewis, S., Otto, F., Pinto, I., Satoh, M., Vicente-Serrano, S. M., Wehner, M. y Zhou, B. 2021. Weather and climate extreme events in a changing climate. V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, J. B. R. Matthews, S. Berger, M. Huang, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou, E. Lonnoy, T. K. Maycock, T. Waterfield, K. Leitzell y N. Caud (eds), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribución del Grupo de Trabajo I al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge, Reino Unido/Nueva York, Cambridge University Press, pp. 1513-1766. doi.org/10.1017/9781009157896.013.
- Shrestha, S., Chapagain, P. S. y Ghimire, M. 2019. Gender perspective on water use and management in the context of climate change: A case study of Melamchi watershed area, Nepal. *Sage Open*, Vol. 9, No. 1. doi.org/10.1177/2158244018823078.
- Somers, L. D. y McKenzie, J. M. 2020. A review of groundwater in high mountain environments. *Wiley Interdisciplinary Reviews (WIREs): Water*, Vol. 7, No. 6, Artículo e1475. doi.org/10.1002/wat2.1475.
- Sumann, G., Moens, D., Brink, B., Brodmann Maeder, M., Greene, M., Jacob, M., Koirala, P., Zafren, K., Ayala, M., Musi, M., Oshiro, K., Sheets, A., Strapazzon, G., Macias, D. y Paal, P. 2020. Multiple trauma management in mountain environments: A scoping review. *Scandinavian Journal of Trauma, Resuscitation and Emergency Medicine*, Vol. 28, Artículo 117. doi.org/10.1186/s13049-020-00790-1.
- Taylor, C., Robinson, T. R., Dunning, S., Carr, J. R. y Westoby, M. 2023. Glacial lake outburst floods threaten millions globally. *Nature Communications*, Vol. 14, Artículo 487. doi.org/10.1038/s41467-023-36033-x.
- Thornton, J. M., Snethlage, M. A., Sayre, R., Urbach, D. R., Viviroli, D., Ehrlich, D., Muccione, V., Wester, P., Insarov, G. y Adler, C. 2022. Human populations in the world's mountains: Spatio-temporal patterns and potential controls. *PLoS ONE*, Vol. 17, No. 7, Artículo e0271466. doi.org/10.1371/journal.pone.0271466.
- Tiwari, P. C., Tiwari, A. y Joshi, B. 2018. Urban growth in Himalaya: Understanding the process and options for sustainable development. *Journal of Urban and Regional Studies on Contemporary India*, Vol. 4, No. 2, pp. 15-27. core.ac.uk/download/pdf/222961854.pdf.
- UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza). s.f. Nepal. Sitio web de UICN. iucn.org/our-work/region/asia/countries/Nepal.
- UNU-EHS (Instituto de Medio Ambiente y Seguridad Humana de la Universidad de las Naciones Unidas). 2023. Five Insights Towards Systemic Risk Reduction in Mountains. Sitio web del UNU-EHS, 9 de octubre de 2023. unu.edu/ehs/series/5-insights-towards-systemic-risk-reduction-mountains.
- Zogarís, S., Jayasinghe, A. D., Sanjaya, K., Vlami, V., Vavalidis, T., Grapci-Kotori, L. y Vanhove, M. P. M. 2021. Water management impacts on mountain rivers: Insights from tropical, subtropical and Mediterranean-climate basins. E. Dimitriou y C. Papadaki (eds), *Environmental Water Requirements in Mountainous Areas*. Elsevier, pp. 155-200. doi.org/10.1016/B978-0-12-819342-6.00004-X.

Capítulo 5

Industria y energía

ONUDI

Jon Marco Church

Con contribuciones de: John Payne y Christian Susan (ONUDI)

• • •
Las industrias dependientes del agua se han desarrollado en zonas montañosas donde el agua y otros recursos son relativamente abundantes

Resulta paradójico que la industria y la energía sean a la vez responsables y víctimas del cambio climático en las zonas montañosas y la criosfera. Registros de mediados del siglo XIX indican un retroceso abrupto de los glaciares como resultado del forzamiento radiativo producido por la creciente deposición de carbono negro industrial en la nieve (véase el cuadro 2.1), especialmente en Europa Occidental (Sigl et al., 2018, p. 50; Beard et al., 2022a; 2022b). El calentamiento global está exacerbando este retroceso.

Este capítulo demuestra cómo el uso del agua por parte de los sectores industrial y energético en las zonas montañosas puede adaptarse a una criosfera que cambia rápidamente (IPCC, 2019) debido al derretimiento de los glaciares y la disminución de la capa de nieve, y los cambios que esto implica para las aguas superficiales y subterráneas.

Así como la industria y la energía son importantes para el agua y los glaciares en las zonas montañosas, el agua también es importante para la industria y la energía. Las industrias dependientes del agua se han desarrollado en zonas montañosas donde el agua y otros recursos son relativamente abundantes (Perlik, 2019; Modica, 2022). Esto ha contribuido a la industrialización de las zonas montañosas (Collantes, 2009). Como resultado, las zonas montañosas de Europa tienen relativamente más personas empleadas en el sector industrial que las zonas de tierras bajas (Nordregio, 2004). En América Latina, se estima que el 85 % de la energía hidroeléctrica generada en los países andinos se produce en zonas montañosas (Alianza para las Montañas, 2014). El suministro de agua mineral potable es una actividad industrial importante, ya que el recurso se extrae a menudo de las zonas montañosas.

Además de la producción industrial y energética, en particular en centrales hidroeléctricas, así como en centrales eléctricas de carbón y leña, el agua también es necesaria para procesar minerales, producir madera y desarrollar el turismo en zonas montañosas (Talandier y Donsimoni, 2022). Por ejemplo, el agua es necesaria para fabricar la nieve artificial que se utiliza en la industria del esquí cuando la nieve natural no es suficiente; además, el agua es fundamental para el rafting y la navegación a vela, y también para la pesca recreativa y la hostelería (FAO/ONU Turismo, 2023). La cantidad y la calidad del agua, así como la biodiversidad acuática, se ven afectadas por la industria y la producción energética, así como por el cambio climático, por ejemplo, a través del derretimiento de los glaciares, el deshielo del permafrost y los cambios en los límites superiores de las líneas de árboles y otros tipos de vegetación (Zou et al., 2023).

Existe poca evidencia sobre las tendencias en el desarrollo industrial y energético con uso intensivo de agua en las zonas montañosas. A medida que evolucionan las economías de los países en desarrollo, el abandono de la agricultura y las industrias extractivas como principales motores económicos (Connor y Chaves Pacheco, 2024) también ha afectado a las zonas montañosas, donde el sector servicios —incluidos el turismo, el comercio, la educación y la salud— suele ser la principal fuente de empleo.

Debido a la expansión global de las industrias dependientes del agua, es probable que el uso industrial del agua también esté creciendo en las montañas. Por ejemplo, a nivel mundial la extracción de materias primas podría aumentar casi un 60 % para 2060 con respecto al nivel de 2020 (PNUMA, 2024). Además, la importación de agua virtual —es decir, el agua “oculta” empleada para el intercambio de productos y materiales— es un factor de producción importante para la industria de montaña.

No debe subestimarse el retorno del agua a las montañas en términos de bienes y servicios. Las zonas montañosas pueden ser entornos que, debido a sus límites, requieren importar más agua virtual de la que se exporta (Cabello et al., 2015; Malo-Larrea et al., 2022; Church, 2024).

5.1 Retos

Un desafío importante para la industria y la energía es la altitud a la que es posible operar. Esto se relaciona con la pendiente y también con la temperatura, ya que el agua congelada no es apta para el consumo ni para otros usos. Sin embargo, existen prácticas industriales en zonas glaciares, así como en regiones polares, como la minería, la transmisión de energía, las actividades relacionadas con la infraestructura de telecomunicaciones y algunos sectores turísticos (Smith López et al., 2024). Ya que las condiciones mencionadas arriba pueden generar enormes costos de inversión y funcionamiento, las actividades industriales suelen limitarse a aquellas con una alta rentabilidad de la inversión.

El calentamiento global está haciendo que la inversión sea más riesgosa debido a las incertidumbres, a los peligros más frecuentes y en cascada relacionados con fenómenos naturales (como desbordamientos de lagos glaciares, avalanchas, flujos de lodo e inundaciones), así como a riesgos vinculados con la tecnología como fallas en las presas de relaves y otras infraestructuras (Tuihedur Rahman et al., 2024).

Cuando las temperaturas aumentan el hielo comienza a derretirse, dependiendo principalmente de la altitud, la latitud y la estación. Los cambios en la criosfera están influyendo rápidamente en los límites de la altitud a la que se puede operar, ya que cada vez más montañas carecen de glaciares y nieve. La lluvia y las aguas subterráneas, incluidos los acuíferos kársticos, son importantes para la industria y la energía. Los cambios en las precipitaciones y la permeabilidad del suelo en las zonas montañosas también representan un importante desafío técnico.

Gestionar un recurso que a menudo se percibe como abundante a nivel local es un desafío. Las personas pueden darlo por sentado, especialmente en zonas alimentadas por glaciares; sin embargo, se prevé que dichos glaciares se derritan más rápido con el calentamiento global. Esto puede provocar sobreexplotación y sequías, tanto aguas abajo como en las propias zonas montañosas (Orr et al., 2024). El cambio climático y los cambios en los patrones de precipitación suelen exacerbar las sequías.

El mayor desafío es la desconexión entre la disponibilidad y el suministro local de agua y su uso para satisfacer la demanda de los sectores industrial y energético, que depende de las economías y los mercados locales, nacionales y globales. En épocas de escasez hídrica, puede haber demanda de productos que requieren un uso intensivo del agua, lo que puede generar conflictos de uso a nivel local en zonas montañosas y entre las comunidades río arriba y río abajo (Füreder et al., 2018).

5.2 Impacto de la contaminación industrial en la calidad del agua

El desarrollo industrial y energético puede afectar la calidad del agua (figura 5.1). Además, debido al progresivo declive poblacional y económico, las zonas montañosas remotas pueden ser difíciles de regular, lo que resulta en extracciones y vertidos descontrolados de agua, y también en la liberación de contaminantes (Machate et al., 2023). El desarrollo industrial y las zonas industriales abandonadas alteran el régimen hídrico de los sitios y los ecosistemas relacionados con el agua, y pueden provocar la infiltración de contaminantes en las aguas superficiales y subterráneas (Modica, 2022).

La gestión de aguas residuales industriales puede representar un gran desafío en las zonas montañosas, donde la pendiente puede dificultar el desarrollo de sistemas de almacenamiento, tratamiento y reutilización *in situ* de agua y residuos. Actividades insuficientemente reguladas, como la minería y la piscicultura, pueden provocar fugas significativas de contaminantes, incluyendo metales pesados y contaminantes orgánicos persistentes como pesticidas y antibióticos (Wright et al., 2011; ONUDI, 2017). La gestión de relaves mineros, incluidos los de minas cerradas, es crucial, considerando también

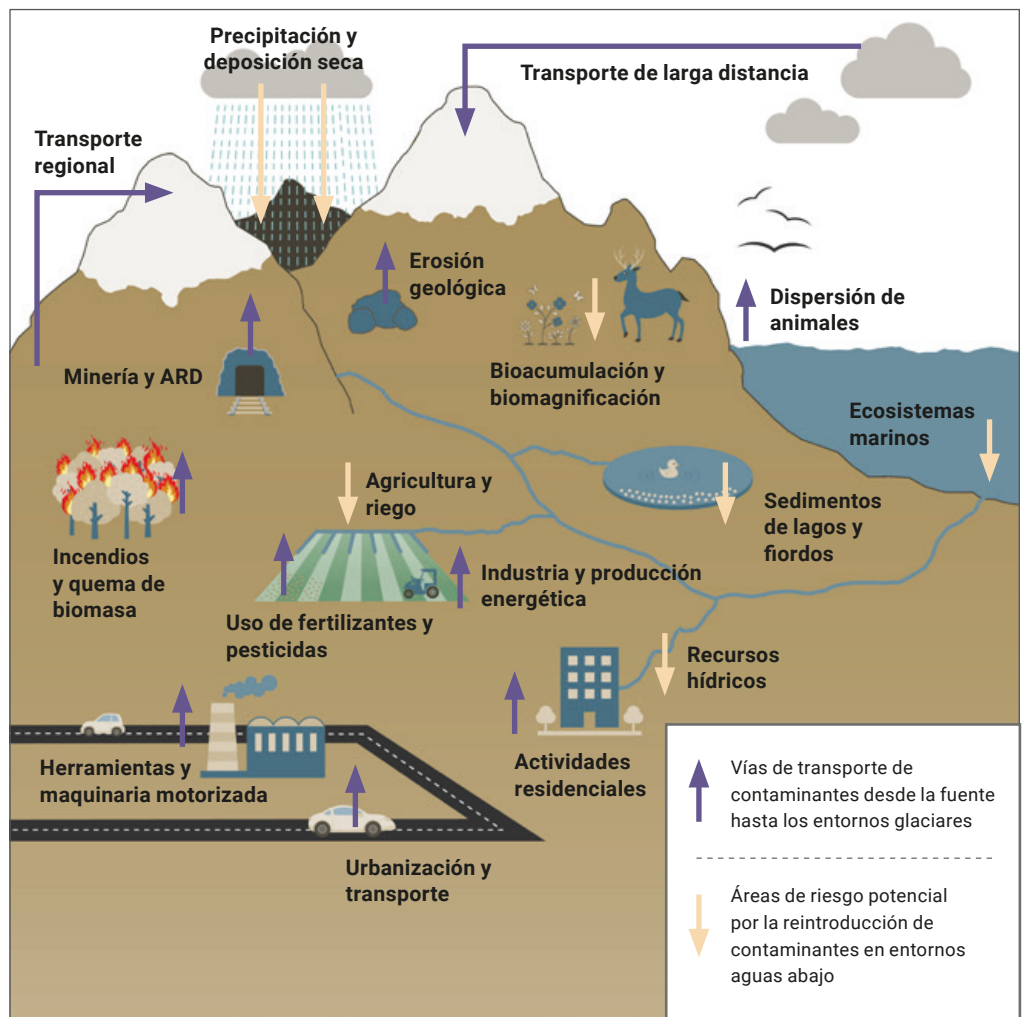
• • •
Las comunidades de montaña pueden ser vulnerables a la contaminación industrial del agua

el riesgo de desastres naturales que afecta a las zonas montañosas (Zoï Environment Network, 2013; CEPE, 2014).

Las comunidades de montaña pueden ser vulnerables a la contaminación industrial del agua. Un desarrollo industrial y energético insuficientemente regulado puede tener repercusiones negativas para las zonas aguas arriba y aguas abajo. Las zonas aguas abajo dependen de los desarrollos aguas arriba y son vulnerables a ellos, aun cuando las tierras bajas suelen ser más ricas que las zonas montañosas y, por lo tanto, pueden contar con más recursos para su resiliencia (Perlik, 2015). Además, los impactos negativos a nivel transfronterizo y los accidentes industriales relacionados con el agua pueden exacerbar las relaciones entre las comunidades aguas arriba y aguas abajo (CEPE, 2016).

Las mujeres, los niños, las personas mayores y las personas con discapacidad suelen ser muy numerosos en las comunidades montañosas debido a la migración laboral hacia zonas más ricas (Mishra, 2002). Esto significa que, en las zonas montañosas, la contaminación industrial afecta especialmente a estos grupos.

Figura 5.1
 Vías de transporte y procesos de deposición de contaminantes en entornos glaciares



5.3 Ejemplos de uso del agua en los sectores industrial y energético

● ● ●
El rápido desarrollo de la criptominería relacionada con la energía hidroeléctrica en las zonas montañosas es una amenaza para la industria y los sectores energéticos

Un ejemplo del uso industrial y energético del agua en zonas de montaña es la extracción a gran escala de litio, utilizado para fabricar baterías y derivado de métodos de minería de salmueras de litio basados en la evaporación; dicha actividad se concentra particularmente en la zona que abarca el suroeste del Estado Plurinacional de Bolivia y el norte de la Argentina y Chile. Esta zona alberga el 56 % del total de los recursos de litio identificados en el mundo. La actividad ejerce un estrés significativo sobre las aguas superficiales y subterráneas, así como sobre los humedales y otros ecosistemas relacionados con el agua. En consecuencia, este estrés también se ejerce sobre las comunidades que dependen de esas aguas. Para producir 1 t de litio se necesitan unos 2 000 m³ de agua, en una zona de clima árido y escasas precipitaciones (CEPAL, 2023).

La minería artesanal y a pequeña escala también puede tener enormes repercusiones aguas arriba y aguas abajo. Por ejemplo, el uso de mercurio en la extracción de oro es peligroso para la calidad y disponibilidad del agua y la salud pública (PNUMA, 2012). Los movimientos comunitarios y ecologistas desempeñan un papel fundamental a la hora de concienciar y ayudar a abordar estos problemas; la mina de oro de Pascua-Lama es un ejemplo concreto en este sentido (cuadro 5.1).

Además, el rápido desarrollo de la criptominería relacionada con la energía hidroeléctrica en las zonas montañosas es una amenaza para la industria y los sectores energéticos. La criptominería es un proceso clave en la emisión de criptomonedas y utiliza recursos informáticos especializados que requieren grandes cantidades de energía barata. El carbón es la principal fuente de energía utilizada, con una cuota del 45 %, y la energía hidroeléctrica la principal fuente de energía renovable, con un 16 % (Chamanara y Madani, 2023). Ambas se producen a menudo en zonas montañosas, con importantes repercusiones en la cantidad y calidad de los recursos hídricos (tabla 5.1), así como en las redes eléctricas. Por ejemplo, en Asia Central varias criptomonedas operan en las montañas de Kazajistán y Kirguistán, donde se dispone de electricidad barata. Esto ha aumentado la presión sobre el sistema eléctrico hasta el punto de que, en enero de 2022, todo el Sistema Energético Unificado de Asia Central se colapsó temporalmente, lo que provocó un apagón a gran escala que afectó a millones de personas en el sur de Kazajistán, Kirguistán y Uzbekistán.

Tabla 5.1 Huella hídrica anual de la minería de bitcoin en el mundo, 2020-2021

País	Huella hídrica (millones m ³)	Huella hídrica (m ³ /persona)
China	780,05	0,55
Estados Unidos de América	205,73	0,62
Canadá	150,01	3,85
Kazajistán	104,18	5,31
Federación de Rusia	94,11	0,65
Malasia	64,57	1,90
Alemania	51,94	0,62
Noruega	39,91	7,31
Irán (República Islámica del)	19,25	0,22
Tailandia	17,98	0,25
Todos los demás países	119,84	0,02

Fuentes: elaboración propia a partir de datos de Chamanara y Madani (2023, fig. 7, p. 17) y División de Estadísticas de las Naciones Unidas (s.f.).

La producción de nieve artificial utiliza una cantidad significativa de agua. Por ejemplo, se calcula que solo en los Alpes se han utilizado 280 millones de m³ de agua (Unbehaun y Pröbstl, 2006) y 2 100 GW de electricidad (Hamberger y Doering, 2015). En 2009, el Convenio de los Alpes informó de que en dos estaciones de esquí suizas “*la innivación es responsable del 22 % y el 36 % de la extracción anual de agua*” y que “*la innivación artificial puede provocar conflictos con la demanda de agua para otros usos (por ejemplo, el suministro de agua potable)*” (Secretaría Permanente del Convenio de los Alpes, 2009, p. 65). A fin de garantizar el suministro de agua necesario para la producción de nieve artificial cuando el agua escasea en invierno, se han construido estanques de almacenamiento para guardar el agua cuando abunda en verano y otoño.

La silvicultura y la producción maderera son importantes para las zonas de montaña, aunque la altitud y otros factores hacen que los bosques de montaña sean, por término medio, menos productivos y rentables que los de las tierras bajas. Por ello, la producción y el procesamiento de madera se han trasladado a menudo a las tierras bajas (Price et al., 2011). Aun así, los bosques de montaña desempeñan un papel clave en la gestión del agua (Schyns y Vanham, 2019). Dependiendo de los tipos de árboles, los bosques de montaña pueden retener cantidades significativas de agua y humedad en las cuencas altas, estabilizar el suelo y reducir la erosión, contribuyendo así a reducir el riesgo de peligros relacionados con el agua. Como tales, pueden considerarse soluciones basadas en la naturaleza. No ocurre lo mismo con las plantaciones de árboles para la producción de madera, cuya capacidad de absorción suele ser inferior a la de los bosques naturales. Los impactos de la silvicultura en la calidad del agua incluyen “*aporte de sedimentos, pérdidas de nutrientes, transporte de carbono, liberación de metales y cationes básicos*”, así como “*cambios en la acidez y la temperatura*” (Shah et al., 2022, p. 1).

Cuadro 5.1 Proteger los glaciares del impacto de la minería: la mina Pascua-Lama en Chile

Pascua-Lama es una explotación aurífera a cielo abierto situada en los Andes, entre 3 800 y 5 200 m sobre el nivel del mar y a caballo entre la Argentina y Chile. Ilustra la compleja interacción de intereses, perspectivas y percepciones empresariales, gubernamentales e indígenas a través del prisma de los glaciares y el abastecimiento de agua (Kronenberg, 2009; Amos-Landgraf, 2021).

Los tres glaciares afectados están en el lado chileno y son pequeños. En un principio, una empresa minera recibió la aprobación, tras una evaluación de impacto ambiental, para desplazar y colocar el hielo en un glaciar cercano. Este plan suscitó la oposición de las comunidades locales, de la comunidad internacional y del Gobierno chileno, por las posibles amenazas para la agricultura, el medio ambiente y la salud.

En 2006, las autoridades medioambientales chilenas dictaminaron que la empresa minera no debía tocar los glaciares, sino protegerlos y vigilarlos. El valor de la disponibilidad de agua garantizada por la escorrentía glaciar para las comunidades situadas aguas abajo influyó mucho en la decisión. Los glaciares más pequeños son más susceptibles al calentamiento global, y es posible que su valor esté más vinculado al lugar donde se encuentran (Kronenberg, 2009). Si el deshielo de los glaciares se ha convertido en un símbolo del calentamiento global, probablemente se debe también al papel que desempeñan las cuestiones políticas y sociales a este respecto.

En 2013, el proyecto minero quedó en suspenso tras una petición de la comunidad indígena Diaguita, que residía cerca de la mina y protestaba por la extracción excesiva de agua de los glaciares y del río Estrecho. En 2020, el Primer Tribunal Ambiental de Chile ordenó el cierre de la mina y multó a la empresa minera. Entre los cargos que se le imputaban a la empresa estaban la contaminación del río Estrecho, alimentado por glaciares —una importante fuente de agua para uso doméstico y de riego a nivel regional—, y no haber evaluado adecuadamente el impacto de la mina en los glaciares andinos. También se afirmó que las perforaciones de exploración habían puesto en peligro la filtración de las aguas subterráneas, provocando la contaminación de los ríos locales.

La situación de Pascua-Lama demuestra que hay una mayor disponibilidad a tomar acciones para preservar los glaciares y reconocer su valor, y dio lugar a la protección legal de los glaciares implicados. El proyecto ha fomentado un amplio debate sobre la minería y sus posibles efectos en los glaciares.

5.4 Energía hidroeléctrica en zonas de montaña

• • •
*La generación
de energía
hidroeléctrica
ha sido una de
las principales
actividades
industriales de las
zonas de montaña*

La generación de energía hidroeléctrica ha sido una de las principales actividades industriales de las zonas de montaña (WWAP, 2014). Su desarrollo comenzó a finales del siglo XIX en Europa y Norteamérica, donde se ralentizó hasta la década de 1970, debido a la creciente resistencia de los movimientos ecologistas y a la escasez de emplazamientos adecuados. En el resto del mundo, el desarrollo hidroeléctrico repuntó tras la Segunda Guerra Mundial y sigue siendo importante. Las centrales hidroeléctricas pueden ser grandes (>100 MW), medianas (15-100 MW) y pequeñas (<15 MW).

Un ejemplo típico de desarrollo significativo del sector hidroeléctrico en zonas montañosas es la presa, embalse y central hidroeléctrica de Nurek, en Asia Central. Situada a lo largo del río Vakhsh, en Tayikistán, la planta forma parte de un complejo que incluye la central hidroeléctrica de Rogun, actualmente en construcción (Rahimzoda, 2024). Nurek fue involucrada en un programa de desarrollo integrado concebido en la década de 1960, cuando la zona formaba parte de la antigua Unión Soviética. El objetivo de dicho programa era generar electricidad para el desarrollo industrial y fortalecer la agricultura de montaña mediante el riego por bombeo, regulando al mismo tiempo el agua para el riego aguas abajo y el control de las inundaciones en Tayikistán y los países situados aguas abajo (Kalinovsky, 2021).

Tras generar la mayor parte de la electricidad producida en el país durante cuatro décadas, Nurek está siendo modernizado para optimizar su funcionalidad. Sin embargo, el embalse se está reduciendo progresivamente debido a la sedimentación, por lo que está perdiendo su capacidad de regular el agua y generar energía. La finalización de otros proyectos a lo largo de la cascada de Vakhsh, en particular el que tiene que ver con la central de Rogun, ayudará a resolver este problema. La financiación necesaria es enorme en comparación con el tamaño de la economía del país, y también lo son las repercusiones sociales y medioambientales, que se evaluaron en cooperación con los países vecinos (Banco Mundial, 2014).

También hay muchos ejemplos de centrales hidroeléctricas medianas y pequeñas en zonas montañosas, incluidas centrales de pasada. La presencia de una pendiente permite generar energía hidroeléctrica sin construir grandes presas y embalses. El diseño y la ubicación de las pequeñas centrales hidroeléctricas suelen reducir el impacto de la generación hidroeléctrica en los recursos hídricos, la biodiversidad y el paisaje. Sin embargo, a grandes altitudes las pequeñas centrales hidroeléctricas no suelen funcionar en climas fríos debido a la congelación y a la falta de precipitaciones (Katsoulakos y Kaliampakos, 2014).

El desarrollo no regulado y mal planificado de pequeñas centrales hidroeléctricas puede tener repercusiones negativas en los recursos hídricos. Por ejemplo, en Georgia, algunos ríos se han secado debido al exceso de pequeñas centrales hidroeléctricas (Japoshvili et al., 2021). En 2018, el Convenio de los Alpes, un acuerdo regional en materia de medio ambiente, publicó directrices específicas para el uso de pequeñas centrales hidroeléctricas (Plataforma Gestión del Agua en los Alpes, 2018).

Por ello, las centrales hidroeléctricas de montaña pueden ser demasiado grandes para el contexto, pero también demasiado pequeñas para ser eficaces; por lo tanto, su diseño es extremadamente importante. Para orientar su desarrollo se necesitan varios documentos importantes que tengan en cuenta las especificidades de las zonas de montaña, incluidos los efectos en cascada. Por ejemplo, puede ser necesario un plan de gestión de la cuenca hidrográfica, una evaluación ambiental estratégica, una política energética nacional, una evaluación de los riesgos relacionados con el cambio climático, una evaluación del impacto ambiental y social (no siempre para los proyectos más pequeños), un plan de gestión ambiental y social y normas operativas.

● ● ●

La protección del medio ambiente es uno de los principales motores de la resistencia al desarrollo del sector hidroeléctrico, ya que los ecosistemas de montaña son frágiles

El deshielo de los glaciares y la escorrentía de las precipitaciones pueden descender por laderas empinadas recorriendo distancias relativamente cortas, lo que las hace idóneas para generar energía. La forma de los valles de las montañas permite construir presas. En las zonas montañosas también se pueden encontrar materiales de construcción para ataguías¹⁴ y otras estructuras relevantes. Cuando se construyen salas de máquinas en el interior de las montañas, las turbinas y otros componentes de las centrales hidroeléctricas quedan protegidos de las inundaciones, las corrientes de lodo y otros peligros.

Los embalses de las zonas montañosas pueden almacenar grandes cantidades de agua para generar energía hidroeléctrica cuando se necesita y reducir así la dependencia estacional. La energía hidroeléctrica adquiere cada vez más importancia con el desarrollo de fuentes de energía renovables, como la solar y la eólica, cuya producción es variable y necesita equilibrarse rápidamente para hacer funcionar las redes eléctricas. Como tales, los embalses hidroeléctricos actúan como almacenamiento de recursos hídricos, así como de energía renovable (Secretaría Permanente del Convenio de los Alpes, 2017). Los embalses pueden generar nuevos ecosistemas que pueden convertirse en focos de biodiversidad. Por ejemplo, el lago Vlasina, en Serbia, está ahora protegido por la Convención de Ramsar sobre los Humedales.

En todo el mundo, las zonas de montaña tienden a tener una menor densidad de población y menos ingresos económicos que las tierras bajas adyacentes (Thornton et al., 2022). Por este motivo, el desarrollo de la energía hidroeléctrica puede tener un menor impacto social y económico aguas arriba que en las tierras bajas. Las comunidades de montaña y sus líderes también suelen disponer de recursos humanos y financieros limitados para resistirse a dichas circunstancias. Sin embargo, las zonas de montaña no están desconectadas de otras regiones. Quienes residen en las montañas, las élites urbanas y otras partes interesadas, incluso del otro lado del mundo, pueden unir fuerzas para proponer alternativas para el desarrollo de zonas que de otro modo estarían destinadas a proyectos hidroeléctricos y de grandes infraestructuras (Perlik, 2019).

La protección del medio ambiente es uno de los principales motores de la resistencia al desarrollo del sector hidroeléctrico, ya que los ecosistemas de montaña son frágiles. La construcción y presencia de presas y embalses, líneas de transmisión y subestaciones puede tener un impacto significativo. Por ejemplo, las presas crean barreras a la biodiversidad acuática, los embalses largos obstaculizan la migración de grandes mamíferos, y las obras de construcción desestabilizan los lechos fluviales, destruyen humedales, modifican los hábitats, la hidrogeología y el clima local, y perturban la vida acuática (WWAP, 2014).

Los pasos para peces y otras técnicas utilizadas para mitigar o compensar los daños son solo parcialmente eficaces (FAO/DVWK, 2002; Venus et al., 2020). Los diseños de lechos fluviales, como los experimentados en los ríos Loisach e Iller en Alemania, también pueden ayudar a reducir algunos impactos ambientales. Sin embargo, siguen dependiendo de la disponibilidad de agua (ONU/CI/PH, 2022). Los sedimentos típicamente presentes en las aguas de montaña también dañan los componentes y llenan los embalses, reduciendo así la vida útil de las centrales hidroeléctricas. El lavado de sedimentos y otras técnicas ayudan a gestionar este problema. Las centrales hidroeléctricas también pueden construirse en cascada a lo largo del mismo río para contener el impacto. El enfoque del nexo agua-energía-alimentación-medio ambiente puede ser útil para abordar estas cuestiones (Wymann von Dach y Fleiner, 2019).

¹⁴ Cerramientos estancos temporales para evitar filtraciones de agua.

Los embalses de montaña desempeñan un papel relevante en la adaptación al cambio climático, ya que almacenan agua para su uso en épocas de sequía y contienen el caudal alto de los ríos, reduciendo así la probabilidad de inundaciones aguas abajo (Presidencia francesa del Convenio de los Alpes, 2020; Adler et al., 2022). Pueden ser infraestructuras clave para la reducción del riesgo de desastres, pero también pueden verse afectadas por terremotos, corrimientos de tierras, aludes de lodo, inundaciones y deterioro estructural. Un ejemplo bien conocido es el desastre que ocurrió en 2021 en el distrito de Chamoli, en la India septentrional (Shugar et al., 2021), cuando una avalancha de rocas y hielo glaciario provocó una inundación de lodo y escombros que destruyó dos centrales hidroeléctricas en construcción río abajo y valoradas en más de 223 millones de dólares estadounidenses. En 1963, se atribuyeron 1 917 muertes a un suceso similar en el arroyo Vajont, en Italia septentrional, cuando la presa se desbordó, inundando todo un valle (Merlin, 2001). La mala gestión de los embalses de montaña puede contribuir a que se produzcan incidentes, incluso a nivel transfronterizo.

El cambio climático está afectando a la generación de energía hidroeléctrica debido a factores como el deshielo de los glaciares, los cambios en los patrones de precipitación y el aumento de la evaporación. No existen datos sobre en qué medida la generación hidroeléctrica existente y prevista depende del deshielo de los glaciares a nivel mundial. Por lo tanto, es difícil evaluar cómo está afectando el cambio de la criosfera a la energía hidroeléctrica y si esto se ve compensado positiva o negativamente por otros factores, como el aumento de las precipitaciones y la evaporación. Tampoco hay pruebas de que el calentamiento global vaya a aumentar la cantidad de agua disponible para la energía hidroeléctrica. Parece que el aumento del deshielo de los glaciares se ve contrarrestado por el incremento de la evaporación (Cooley, 2023). Los satélites revelan una disminución generalizada del almacenamiento de agua en los lagos a nivel global, incluidos los embalses artificiales (Yao et al., 2023). Por lo tanto, es posible que ya se haya alcanzado el punto máximo de deshielo (véase el cuadro 2.2) a escala mundial, especialmente en el caso de las centrales hidroeléctricas con grandes embalses en elevaciones y latitudes más bajas, donde la evaporación es mayor.

5.5 Respuestas para un desarrollo industrial inclusivo y sostenible

Existen respuestas para hacer más sostenible la producción industrial y energética en las zonas de montaña, mientras que otras se están desarrollando. Dichas respuestas pueden dividirse en tres grupos: las que promueven una economía circular del agua, las que tienen como objetivo el desarrollo de tecnologías ecológicamente racionales (así como el aumento de la inversión medioambiental, social y de gobernanza) y las que están centradas en la gestión del agua.

La economía circular promueve la reducción del consumo de agua, el reciclaje del agua usada y la reutilización de los recursos hídricos (WBCSD, 2017; Delgado et al., 2021). Por ejemplo, en Arequipa, Perú, una empresa minera ubicada en una zona montañosa abordó su necesidad de agua y los problemas relacionados con las aguas residuales de la ciudad mediante una alianza público-privada con la empresa municipal de agua. La empresa minera financió y construyó una planta de tratamiento de aguas residuales, procesando el 95 % de las aguas residuales de la ciudad, utilizando una parte para las operaciones mineras y vertiendo agua limpia al río local. Esta solución permitió la expansión de la mina, ahorró a la ciudad más de 335 millones de dólares y revitalizó el río, beneficiando a los agricultores y residentes locales (Banco Mundial, 2019).

• • •
La ecologización de las infraestructuras grises o su reemplazo por infraestructuras verdes puede ser la mejor técnica disponible para las zonas montañosas

El almacenamiento de energía hidroeléctrica por bombeo utiliza el exceso de electricidad en horas punta para bombear agua de vuelta a un embalse, almacenando así agua y energía potencial. Representa el 95 % de la capacidad mundial de almacenamiento de electricidad, principalmente en zonas montañosas (IRENA, 2023). El agua almacenada se libera para generar electricidad durante períodos de alta demanda. Si bien consume más energía de la que genera y retiene agua arriba que puede perderse por evaporación, la capacidad del almacenamiento de energía hidroeléctrica para almacenar agua y energía, así como para equilibrar la carga, es valiosa para la estabilidad de la red eléctrica. Por ejemplo, la central eléctrica de Fengning, en China, es la mayor instalación hidroeléctrica de almacenamiento por bombeo del mundo, con una capacidad de 3 600 MW. Su construcción comenzó en 2013 y finalizó en 2021 con un coste de 1 870 000 millones de dólares. La central opera con dos embalses: el inferior con capacidad para 66,15 millones de m³ de agua y el superior para 48,83 millones de m³. La central eléctrica de Fengning está diseñada para proporcionar 6 612 GWh de capacidad de generación de energía a partir del almacenamiento al año (IRENA, 2020; Morales Pedraza, 2024).

Las tecnologías ambientalmente racionales abarcan prácticas como el uso de tecnologías menos contaminantes, una mejor gestión de los recursos y el reciclaje eficiente de residuos. Pueden formar sistemas integrados que combinan conocimientos técnicos, procedimientos operativos y estructuras organizativas con el objetivo de fomentar la sostenibilidad. Estas tecnologías constituyen alternativas más ecológicas a los métodos convencionales, incluyendo iniciativas para reducir el consumo de agua y energía en la producción de nieve artificial (Grünewald y Wolfsperger, 2019). Las empresas están mejorando la tecnología de válvulas para aumentar la eficiencia del uso del agua y utilizan compresores sin petróleo para garantizar que no se viertan residuos de petróleo al medio ambiente. Además, se pueden aprovechar los datos para producir la cantidad y calidad adecuadas de nieve, reduciendo así el desperdicio de recursos. Un beneficio adicional es brindar oportunidades de capacitación y crear conciencia sobre la eficiencia hídrica y energética (TechnoAlpin, 2023).

Cuando la infraestructura industrial y energética existente no cumple con los estándares modernos de las tecnologías ambientalmente racionales, la ecologización de las infraestructuras grises o su reemplazo por infraestructuras verdes (WWAP/ONU-Agua, 2018), incluida la renaturalización, puede ser la mejor técnica disponible para las zonas montañosas.

La gestión del agua, la inversión en los sectores medioambiental, social y de la gobernanza, la investigación y el desarrollo, y la supervisión regulatoria son componentes clave en los casos en que se encuentran respuestas eficaces de economía circular, tecnologías ambientalmente racionales y de otro tipo (Kohler et al., 2012). Existen pocos enfoques específicos para el uso del agua por parte de la industria y la producción de energía en zonas de montaña (Scott et al., 2023). Los intentos de desarrollar prohibiciones específicas para el desarrollo de la energía hidroeléctrica y otros tipos de infraestructura en zonas montañosas no han logrado convertirse en instrumentos jurídicos vinculantes ni en herramientas políticas sólidas, como en el caso del Protocolo sobre la Energía de 2005 del Convenio de los Alpes, que solo ofrece orientación genérica (Austria/Comunidad Europea/Francia/Alemania/Italia/Liechtenstein/Mónaco/Eslovenia/Suiza, 2005; ARE, 2014). Dadas las especificidades del uso del agua por parte de los sectores industrial y energético en las zonas montañosas, particularmente en un contexto de derretimiento de los glaciares, se espera que este ejemplo inspire enfoques más específicos en el futuro (Katsoulakos y Kaliampakos, 2014).

Referencias

- Adler, C., Wester, P., Bhatt, I., Huggel, C., Insarov, G. E., Morecroft, M. D., Muccione, V. y Prakash, A. 2022. Mountains. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem y B. Rama (eds), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribución del Grupo de Trabajo II al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge, Reino Unido/Nueva York, Cambridge University Press, pp. 2273-2318. doi.org/10.1017/9781009325844.022.
- Alianza para las Montañas. 2014. *Por qué las montañas son importantes para la energía: Una llamada a la acción en favor de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)*. Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). openknowledge.fao.org/items/b5a855d1-09ea-4053-a7dd-2fe7512e4666.
- Amos-Landgraf, I. 2021. Chile's Pascua-Lama Mine Legally Shut Down, but Mining Exploration Continues. *State of the Planet*. Nueva York, Columbia Climate School. news.climate.columbia.edu/2021/01/15/pascua-lama-mine-shut-down/.
- ARE (Oficina Federal para el Desarrollo Territorial, Suiza). 2014. *Activity Report of the Energy Platform for the Years 2013-2014*. Berna, ARE.
- Austria/Comunidad Europea/Francia/Alemania/Italia/Liechtenstein/Mónaco/Eslovenia/Suiza. 2005. Protocolo sobre la aplicación del Convenio de los Alpes de 1991 en el ámbito de la energía (Protocolo sobre la Energía). *Diario Oficial de la Unión Europea*, L 337/36 SP de 22/12/2005. eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=OJ:L:2005:337:FULL.
- Banco Mundial. 2014. *Rogun Hydropower Project: Final Report of the Environmental and Social Panel of Experts*. Washington DC, Banco Mundial. www.worldbank.org/en/country/tajikistan/brief/final-reports-related-to-the-proposed-rogun-hpp.
- . 2019. *Wastewater: From Waste to Resource - The Case of Arequipa, Peru*. Washington DC, Banco Mundial. openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/120995b1-dbbb-5e48-b6b8-afbabe6f312f/content.
- Beard, D. B., Clason, C. C., Rangelcroft, S., Poniecka, E., Ward, K. J. y Blake, W. H. 2022a. Anthropogenic contaminants in glacial environments I: Inputs and accumulation. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, Vol. 46, No. 4, pp. 630-648. doi.org/10.1177/03091333221107376.
- . 2022b. Anthropogenic contaminants in glacial environments II: Release and downstream consequences. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, Vol. 46, No. 5, pp. 790-808. doi.org/10.1177/03091333221127342.
- Cabello, V., Willaarts, B. A., Aguilar, M. y Del Moral Ituarte, L. 2015. River basins as social-ecological systems: Linking levels of societal and ecosystem water metabolism in a semiarid watershed. *Ecology and Society*, Vol. 20, No. 3, p. 20. doi.org/10.5751/ES-07778-200320.
- CEPAL (Comisión Económica de las Naciones Unidas para América Latina y el Caribe). 2023. *Extracción e industrialización del litio - Oportunidades y desafíos para América Latina y el Caribe*. Santiago, CEPAL. repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/5c1c160a-557d-42d9-bfa8-929142d2fa21/content.
- CEPE (Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa). 2014. *Safety Guidelines and Good Practices for Tailings Management Facilities*. Ginebra, CEPE. unece.org/DAM/env/documents/2014/TEIA/Publications/1326665_ECE_TMF_Publication.pdf.
- . 2016. *Checklist for Contingency Planning for Accidents Affecting Transboundary Waters - with Introductory Guidance*. Ginebra, CEPE. unece.org/DAM/env/documents/2016/TEIA/ece.cp.teia.34.e_Checklist_for_contingency.pdf.
- Chamanara, S. y Madani, K. 2023. *The Hidden Environmental Cost of Cryptocurrency: How Bitcoin Mining Impacts Climate, Water and Land*. Hamilton, Canadá, Instituto para el Agua, el Medio Ambiente y la Salud de la Universidad de las Naciones Unidas (UNU-INWEH). doi.org/10.53328/INR23ASC02.
- Church, J. M. 2024. *Policy Brief "Central Asia's Trade in Virtual Water: SPECA Policy Brief on Sustainable Trade and Water Management"*. Foro Económico 2024, Dusanbé, 26 de noviembre de 2024. Programa Especial de las Naciones Unidas para las Economías de Asia Central (SPECA). unece.org/speca/documents/2024/11/working-documents/policy-brief-central-asias-trade-virtual-water-speca-0.
- Collantes, F. 2009. Rural Europe reshaped: The economic transformation of upland regions, 1850-2000. *The Economic History Review*, Vol. 62, No. 2, pp. 306-323. doi.org/10.1111/j.1468-0289.2008.00439.x.
- Connor, R. y Chaves Pacheco, S. M. 2024. *Global Employment Trends and the Water Dependency of Jobs*. París, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000388410.
- Cooley, S. W. 2023. Global loss of lake water storage. *Science*, Vol. 380, No. 6646, p. 693. doi.org/10.1126/science.adi0992.
- Delgado, A., Rodríguez, D. J., Amadei, C. A. y Makino, M. 2021. *Water in Circular Economy and Resilience (WICER)*. Washington DC, Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento/Banco Mundial. openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/36254/163924.pdf.
- División de Estadísticas de las Naciones Unidas. s.f. UN Data: A World of Information. Sitio web de la División de Estadísticas.data.un.org/.
- FAO/DVWK (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura/Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau). 2002. *Fish Passes: Design, Dimensions and Monitoring*. Roma, FAO/DVWK. www.fao.org/3/y4454e/y4454e.pdf.
- FAO/ONU Turismo (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura/ Organización Mundial del Turismo). 2023. *Understanding and Quantifying Mountain Tourism*. Roma/Madrid, FAO/ONU Turismo. doi.org/10.18111/9789284424023.
- Füreder, L., Weingartner, R., Heinrich, K., Braun, V., Köck, G., Lanz, K. y Scheurer, T. (eds). 2018. *Alpine Water - Common Good or Source of Conflicts?* Actas del ForumAlpinum 2018 y de la 7ª Conferencia del Agua. Breitenwang, Austria, 4-6 de junio de 2018. Austrian Academy of Sciences Press. doi.org/10.1553/forumalpinum2018.
- Grünwald, T. y Wolfspurger, F. 2019. Water losses during technical snow production: Results from field experiments. *Frontiers in Earth Science*, Vol. 7, No. 78. doi.org/10.3389/feart.2019.00078.
- Hamberger, S. y Doering, A. 2015. *Der gekaufte Winter: eine Bilanz der künstlichen Beschneidung in den Alpen* [El invierno comprado: una revisión de la producción de nieve artificial en los Alpes]. Múnich, Alemania, Gesellschaft für ökologische Forschung (GöF)/Bund Naturschutz in Bayern (BN). www.vzsb.de/media/docs/Der_gekaufte_Winter_-_8.12.2015.pdf (en alemán).
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2019. *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Reino Unido/Nueva York, Cambridge University Press. doi.org/10.1017/9781009157964.
- IRENA (Agencia Internacional de Energías Renovables). 2020. *Innovation Landscape Brief: Innovative Operation of Pumped Hydropower Storage*. Abu Dabi, IRENA. www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jul/IRENA_Innovative_PHS_operation_2020.pdf.

- . 2023. *The Changing Role of Hydropower: Challenges and Opportunities*. Abu Dabi, IRENA. www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Feb/IRENA_Changing_role_of_hydropower_2023.pdf.
- Japoshvili, B., Couto, T. B. A., Mumladze, L., Epitashvili, G., McClain, M. E., Jenkins, C. N. y Anderson, E. P. 2021. Hydropower development in the Republic of Georgia and implications for freshwater biodiversity conservation. *Biological Conservation*, Vol. 263, No. 109359. doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109359.
- Kalinovsky, A. M. 2021. *Laboratory of Socialist Development: Cold War Politics and Decolonization in Soviet Tajikistan*. Ithaca, EE.UU., Cornell University Press.
- Katsoulakos, N. M. y Kaliampakos, D. C. 2014. What is the impact of altitude on energy demand? A step towards developing specialized energy policy for mountainous areas. *Energy Policy*, Vol. 71, pp. 130-138. doi.org/10.1016/j.enpol.2014.04.003.
- Kohler, T., Pratt, J., Debarbieux, B., Balsiger, J., Rudaz, G. y Maselli, D. (eds). 2012. *Sustainable Mountain Development, Green Economy and Institutions: From Rio 1992 to Rio 2012 and Beyond*. Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE)/Centro para el Desarrollo y el Medio Ambiente (CDE). www.fao.org/3/cc9690en/cc9690en.pdf.
- Kronenberg, J. 2009. *Global Warming, Glaciers and Gold Mining*. Actas de la 8ª Conferencia Internacional de la Sociedad Europea de Economía Ecológica. Liubliana, 29 de junio-2 de julio de 2009. center-hre.org/wp-content/uploads/2013/03/Kronenberg-Global-warming-Glaciers-and-Gold-Mining.pdf.
- Machate, O., Schmeller, D. S., Schulze, T. y Brack, W. 2023. Review: Mountain lakes as freshwater resources at risk from chemical pollution. *Environmental Sciences Europe*, Vol. 35, No. 3. doi.org/10.1186/s12302-022-00710-3.
- Malo-Larrea, A., Santillán, V. y Torracchi-Carrasco, E. 2022. Looking inside the blackbox: Cuenca's water metabolism. *PLOS ONE*, Vol. 17, No. 9, Artículo e0273629. doi.org/10.1371/journal.pone.0273629.
- Merlin, T. 2001. *Sulla pelle viva: come si costruisce una catastrofe, il caso del Vajont* [Sobre la piel viva: cómo se construye una catástrofe, el caso del Vajont]. Sommacampagna, Italia, Cierre edizioni. edizioni.cierrenet.it/wp-content/uploads/2021/12/Sulla-pelle-viva_2021_anteprema.pdf (en italiano).
- Mishra, H. R. 2002. Mountains of the developing world: Pockets of poverty or pinnacles for prosperity. *Unasylva*, Vol. 53, No. 1. www.fao.org/3/Y3549E/y3549e06.htm.
- Modica, M. 2022. *Alpine Industrial Landscapes: Towards a New Approach for Brownfield Redevelopment in Mountain Regions*. Wiesbaden, Alemania, Springer. doi.org/10.1007/978-3-658-37681-9.
- Morales Pedraza, J. 2024. Toward a green economy in China: Current status and perspective in electricity generation. *Academia Green Energy*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-28. doi.org/10.20935/AcadEnergy6236.
- Nordregio (Centro Nórdico para el Desarrollo Espacial). 2004. *Mountain Areas in Europe: Analysis of Mountain Areas in EU Member States, Acceding and other European Countries*. Estudio para la Comisión Europea, DG REGIO. Estocolmo, Nordregio. archive.nordregio.se/en/Publications/Publications-2004/Mountain-areas-in-Europe/index.html.
- ONU DI (Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial). 2017. *Green Chemistry and Beyond Manufacturing Without POPs*. Viena, ONU DI. www.unido.org/sites/default/files/2017-07/UNIDO_leaflet_08_ManufacturingWithoutPOPs_170124_final_0.pdf.
- ONU DI/CIPH (Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial/Centro Internacional para la Pequeña Hidroeléctrica). 2022. *World Small Hydropower Development Report 2022*. Viena/Hangzhou, China, ONU DI/CIPCH. www.unido.org/WSPDR2022.
- Orr, B. J., Dosdogru, F. y Sánchez Santiviáñez, M. 2024. Chapter 3: Land degradation and drought in mountains. S. Schneiderbauer, P. Fontanella Pisa, J. F. Schroder y J. Szarzynski (eds), *Safeguarding Mountain Social-Ecological Systems*. Amsterdam, Elsevier, pp. 17-22. doi.org/10.1016/B978-0-12-822095-5.00003-6.
- Perlik, M. 2015. Mountains as global suppliers: New forms of disparities between mountain areas and metropolitan hubs. *Journal of Alpine Research*, Vol. 103, No. 3. doi.org/10.4000/rga.3142.
- . 2019. *The Spatial and Economic Transformation of Mountain Regions: Landscapes as Commodities*. Londres, Routledge. doi.org/10.4324/9781315768366.
- Plataforma Gestión del Agua en los Alpes. 2018. *Common Guidelines for the Use of Small Hydropower in the Alpine Region*. Innsbruck, Austria/Bolzano, Italia, Secretaría Permanente del Convenio de los Alpes. www.alpconv.org/fileadmin/user_upload/Organisation/AC/XI/ACXI_annex_24_2_EN.pdf.
- PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). 2012. *A Practical Guide: Reducing Mercury Use in Artisanal and Small-Scale Gold Mining*. Nairobi, PNUMA. wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/11524/reducing_mercury_artisanal_gold_mining.pdf.
- . 2024. *Global Resources Outlook 2024: Bend the Trend – Pathways to a Liveable Planet as Resource Use Spikes*. *Global Resources Outlook 2024*. Nairobi, Panel Internacional de Recursos, PNUMA. wedocs.unep.org/20.500.11822/44901.
- Presidencia francesa del Convenio de los Alpes. 2020. *Ressources en eau et rivières alpines : adaptation aux défis du changement climatique. Actes de la conférence organisée dans le cadre de la Présidence française de la Convention alpine*. Impérial Palace, Annecy, Francia, 18-19 de febrero de 2020. Innsbruck, Austria/Bolzano, Italia, Secretaría Permanente del Convenio de los Alpes. www.alpconv.org/fileadmin/user_upload/Fotos/Banner/Topics/watermanagement/Report_water_conference_Annecy_FR.pdf (en francés).
- Price, M. F., Gratzner, G., Alemayehu Duguma, L., Kohler, T., Maselli, D. y Romeo, R. (eds). 2011. *Mountain Forests in a Changing World: Realizing Values, Addressing Challenges*. Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)/Alianza para las Montañas/Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE). www.fao.org/3/i2481e/i2481e.pdf.
- Rahimzoda, S. 2024. Water-energy equation in Central and South Asia: A perspective from Tajikistan. Z. Adeel y B. Boër (eds), *The Water, Energy, and Food Security Nexus in Asia and the Pacific – Central and South Asia*. Cham, Suiza, Springer. doi.org/10.1007/978-3-031-29035-0_4.
- Schyns, J. F. y Vanham, D. 2019. The water footprint of wood for energy consumed in the European Union. *Water*, Vol. 11, No. 2, p. 206. doi.org/10.3390/w11020206.
- Scott, C. A., Khaling, S., Shrestha, P. P., Sebastián Riera, F., Choden, K. y Singh, K. 2023. Renewable electricity production in mountain regions: Toward a people-centered energy transition agenda. *Mountain Research and Development*, Vol. 43, No. 1, pp. A1-A8. doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-21-00062.
- Secretaría Permanente del Convenio de los Alpes. 2009. *Water and Water Management Issues: Report on the State of the Alps*. Alpine Convention: Alpine Signals - Special Edition 2. Innsbruck, Austria/Bolzano, Italia, Secretaría Permanente del Convenio de los Alpes. www.alpconv.org/fileadmin/user_upload/Publications/RSA/RSA2_long_EN.pdf.
- . 2017. *Towards Renewable Alps: A Progress Report for the Period 2015-2016*. Innsbruck, Austria/Bolzano, Italia, Secretaría Permanente del Convenio de los Alpes. www.alpconv.org/fileadmin/user_upload/Publications/Towards_Renewable_Alps_2017.pdf.

- Shah, N. W., Baillie, B. R., Bishop, K., Ferraz, S., Högbom, L. y Nettles, J. 2022. The effects of forest management on water quality. *Forest Ecology and Management*, Vol. 522, No. 120397. doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120397.
- Shugar, D. H., Jacquemart, M., Shean, D., Bhushan, S., Upadhyay, K., Sattar, A., Schwanghart, W., McBride, S., Van Wyk de Vries, M., Mergili, M., Emmer, A., Deschamps-Berger, C., McDonnell, M., Bhambri, R., Allen, S., Berthier, E., Carrivick, J. L., Clague, J. J., Dokukin, M., Dunning, S. A., Frey, H., Gascoign, S., Haritashya, U. K., Huggel, C., Kääh, A., Kargel, J. S., Kavanaugh, J. L., Lacroix, P., Petley, D., Rupper, S., Azam, M. F., Cook, S. J., Dimri, A. P., Eriksson, M., Farinotti, D., Fiddes, J., Gnyawali, K. R., Harrison, S., Jha, M., Koppes, M., Kumar, A., Leinss, S., Majeed, U., Mal, S., Muhuri, A., Noetzli, J., Paul, F., Rashid, I., Sain, K., Steiner, J., Ugalde, F., Watson, C. S. y Westoby, M. J. 2021. A massive rock and ice avalanche caused the 2021 disaster at Chamoli, Indian Himalaya. *Science*, Vol. 373, No. 6552, pp. 300-306. doi.org/10.1126/science.abh4455.
- Sigl, M., Abram, N. J., Gabrieli, J., Jenk, T. M., Osmont, D. y Schwikowski, M. 2018. 19th century glacier retreat in the Alps preceded the emergence of industrial black carbon deposition on high-alpine glaciers. *The Cryosphere*, Vol. 12, No. 10, pp. 3311-3331. doi.org/10.5194/tc-12-3311-2018.
- Smith López, C., Bogdan, A. M., Belcher, K. y Natcher, D. 2024. Advancing a WEF nexus security index for Alaska: An informed starting point for policy making. *Polar Geography*, Vol. 47, No. 2, pp. 71-89. doi.org/10.1080/1088937X.2024.2311785.
- Talandier, M. y Donsimoni, M. 2022. Industrial metabolism and territorial development of the Maurienne Valley (France). *Regional Environmental Change*, Vol. 22, No. 1, p. 9. doi.org/10.1007/s10113-021-01845-4.
- TechnoAlpin. 2023. *2023 Sustainability Report*. Bolzano, Italia, TechnoAlpin. www.technoalpin.com/fileadmin/user_upload/Nachhaltigkeit/Sustainability_Report_ENG.pdf.
- Thornton, J. M., Snethlage, M. A., Sayre, R., Urbach, D. R., Viroli, D., Ehrlich, D., Muccione, V., Wester, P., Insarov, G. y Adler, C. 2022. Human populations in the world's mountains: Spatio-temporal patterns and potential controls. *PLoS ONE*, Vol. 17, No. 7, Artículo e0271466. doi.org/10.1371/journal.pone.0271466.
- Tuihedur Rahman, H. M., Ingram, S. y Natcher, D. 2024. The cascading disaster risk of water, energy and food systems. *Environmental Hazards*, Vol. 23, No. 5, pp. 423-442. doi.org/10.1080/17477891.2024.2323105.
- Unbehaun, W. y Pröbstl, U. 2006. Cloudy prospects in winter sport: How competitive are the Austrian winter sport destinations under conditions of climate change? *Sustainable Solutions for the Information Society*. Undécima Conferencia Internacional sobre Planificación Urbana y Desarrollo Espacial para la Sociedad de la Información. Viena, pp. 381-387. programm.corp.at/cdrom2006/archiv/papers2006/CORP2006_UNBEHAUN.pdf.
- Venus, T. E., Smialek, N., Pander, J., Harby, A. y Geist, J. 2020. Evaluating cost trade-offs between hydropower and fish passage mitigation. *Sustainability*, Vol. 12, No. 20, p. 8520. doi.org/10.3390/su12208520.
- WBCSD (Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible). 2017. *Business Guide to Circular Water Management: Spotlight on Reduce, Reuse and Recycle*. Ginebra, WBCSD. docs.wbcsd.org/2017/06/WBCSD_Business_Guide_Circular_Water_Management.pdf.
- Wright, I. A., Wright, S., Graham, K. y Burgin, S. 2011. Environmental protection and management: A water pollution case study within the Greater Blue Mountains World Heritage area, Australia. *Land Use Policy*, Vol. 28, No. 1, pp. 353-360. doi.org/10.1016/j.landusepol.2010.07.002.
- WWAP (Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos). 2014. *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2014: agua y energía, resumen ejecutivo*. París, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000225741.
- WWAP/ONU-Agua (Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos/ ONU-Agua). 2018. *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018: Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua*. París, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261494.
- Wymann von Dach, S. y Fleiner, R. 2019. *Shaping the Water-Energy-Food Nexus for Resilient Mountain Livelihoods*. Issue Brief on Sustainable Mountain Development. Berna, Centro para el Desarrollo y el Medio Ambiente (CDE). doi.org/10.7892/boris.131606.
- Yao, F., Livneh, B., Rajagopalan, B., Wang, J., Crétaux, J. F., Wada, Y. y Berge-Nguyen, M. 2023. Satellites reveal widespread decline in global lake water storage. *Science*, Vol. 380, No. 6646, pp. 743-749. doi.org/10.1126/science.abo2812.
- Zoi Environment Network. 2013. *A Short Introduction to Environmental Remediation for Mining Legacies: Case Studies from ENVSEC Work in South East Europe*. Ginebra, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA)/Iniciativa sobre Medio Ambiente y la Seguridad (ENVSEC). zoinet.org/wp-content/uploads/2017/10/Mining-SEE-Ebook.pdf.
- Zou, L., Tian, F., Liang, T., Eklundh, L., Tong, X., Tagesson, T., Dou, Y., He, T., Liang, S. y Fensholt, R. 2023. Assessing the upper elevational limits of vegetation growth in global high-mountains. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 286, No. 113423. doi.org/10.1016/j.rse.2022.113423.

Capítulo 6

Medio ambiente

WWAP de la UNESCO
David Coates y Richard Connor

Con contribuciones de: Elisabeth Bernhardt y Ansgar Fallendorf (PNUMA),
Birguy Lamizana Diallo (CLD)

• • •
**Las montañas
suelen poseer
una mayor
biodiversidad
endémica que
las tierras bajas,
incluyendo
importantes
variedades
genéticas de
cultivos agrícolas
y animale**

Las montañas presentan una amplia gama de zonas ecológicas, cada una resultante de una combinación específica de factores como las diferencias de altitud, la geomorfología, el aislamiento y las condiciones microclimáticas (por ejemplo, la insolación). En consecuencia, suelen poseer una mayor biodiversidad endémica que las tierras bajas, incluyendo importantes variedades genéticas de cultivos agrícolas y animales (FAO, 2019). También albergan una gama igualmente diversa de culturas humanas (PNUMA/GRID-Arendal, 2022). Los sistemas montañosos se caracterizan generalmente por temperaturas más bajas y precipitaciones más altas que otros entornos (FAO, 2022) y albergan 25 de los 34 puntos críticos de biodiversidad del mundo (FAO/PNUMA, 2023).

En los ecosistemas montañosos, los bosques cubren aproximadamente el 40 % de la superficie a nivel mundial. A mayor altitud, los bosques dan paso a pastizales y tundra alpina, así como a permafrost y glaciares. Los suelos de montaña se desarrollan en condiciones climáticas rigurosas. Se diferencian significativamente de los suelos de tierras bajas, ya que son menos profundos y más vulnerables a la erosión (Repe et al., 2020). Dichos suelos se degradan con facilidad y frecuencia por diversas actividades humanas, especialmente la eliminación de la vegetación que deja expuesto el suelo desnudo. La recuperación de los suelos degradados y, por lo tanto, de los ecosistemas de altura es lenta.

La Cordillera del Hindu Kush Himalaya (HKH) es el ecosistema alpino más grande y elevado del mundo, con una altitud media de 4 000 m s. n. m.. Con una superficie de más de 5 millones de km², constituye la mayor reserva de nieve y hielo fuera del Ártico y la Antártida, con unos 100 000 km² de glaciares que abastecen de agua dulce a más de 12 000 lagos y más de 10 sistemas fluviales (PNUMA, 2022a). El 60 % de la región del HKH presenta criosfera estacional (nieve, glaciares, permafrost y lagos glaciares; ICIMOD, 2023). Otros ejemplos de ecosistemas únicos incluyen el ecosistema de páramo de los Andes sudamericanos (cuadro 6.1), la Cordillera de los Cárpatos, la vasta Antártida y la transición de la exuberante selva tropical a las praderas alpinas y los picos nevados del Monte Kilimanjaro en África.

6.1 Servicios ecosistémicos de la criosfera de montaña

La criosfera montañosa y los ecosistemas de tierras altas proporcionan servicios ecosistémicos esenciales a las personas que viven en las montañas y a miles de millones de personas en las zonas bajas de los valles (figura 6.1a). Estos servicios contribuyen al logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (figura 6.1b). La regulación del agua (incluidos su almacenamiento y la regulación de las inundaciones) es uno de los servicios más importantes; por ejemplo, se estima que dos tercios de las actividades agrícolas de regadío a nivel mundial dependen de la escorrentía procedente de las montañas (Adler et al., 2022; véase el capítulo 3). Otros servicios ecosistémicos clave incluyen la reducción del riesgo de erosión y deslizamientos de tierra, el enfriamiento de las temperaturas locales, la captura de carbono, el suministro de alimentos y fibras, y el mantenimiento de reservas de recursos genéticos para cultivos y ganado adaptados a las condiciones locales (FAO/PNUMA, 2023).

Los terrenos de montaña con permafrost contienen aproximadamente 66 µg de carbono orgánico en el suelo, lo que representa el 4,5 % del carbono a nivel global (FAO, 2022). Las turberas de gran altitud son depósitos de carbono particularmente importantes a escala mundial (PNUMA, 2022b). Las cordilleras más grandes, como los Andes, el Gran Cáucaso y el Himalaya, también son importantes para la regulación del clima.

La agricultura, junto a la ganadería, la producción de madera y otros recursos forestales, suele ser un pilar de la subsistencia a nivel local. La pesca en zonas de gran altitud, basada en especies de peces adaptadas, puede ser una fuente importante, y a menudo pasada por alto, de medios de vida a escala local y de seguridad alimentaria y nutricional (FAO, 2003). El cambio climático ha estado alterando las zonas de pesca en lagos glaciares (Tingley et al., 2019).

Cuadro 6.1 Los páramos, un ecosistema montañoso único en Sudamérica

Los páramos se distribuyen a lo largo de la cordillera neotropical de los Andes en Colombia, en el Ecuador, en el norte del Perú y en la República Bolivariana de Venezuela. Constituyen uno de los ecosistemas de alta montaña con mayor biodiversidad y son cruciales para la supervivencia de millones de personas, ya que constituyen la principal fuente de agua potable para los habitantes de capitales como Bogotá y Quito.

La vegetación desempeña un papel fundamental en la regulación de la cantidad y la calidad del agua que suministran estas “esponjas acuáticas” andinas. Además de facilitar la infiltración del agua al suelo, la cobertura vegetal también reduce la evaporación en comparación con el suelo desnudo. Las plantas también pueden captar agua de la niebla.

Los páramos también han sido fuente de plantas medicinales, pastos y tierras agrícolas para los pueblos indígenas. Sin embargo, los paisajes están cambiando y su funcionalidad se está reduciendo.



Lagunas de Siecha, páramo de Chingaza, Colombia

Fotografía: © Matthieu Cattin/Shutterstock*.

Fuente: Baruffol (2020).

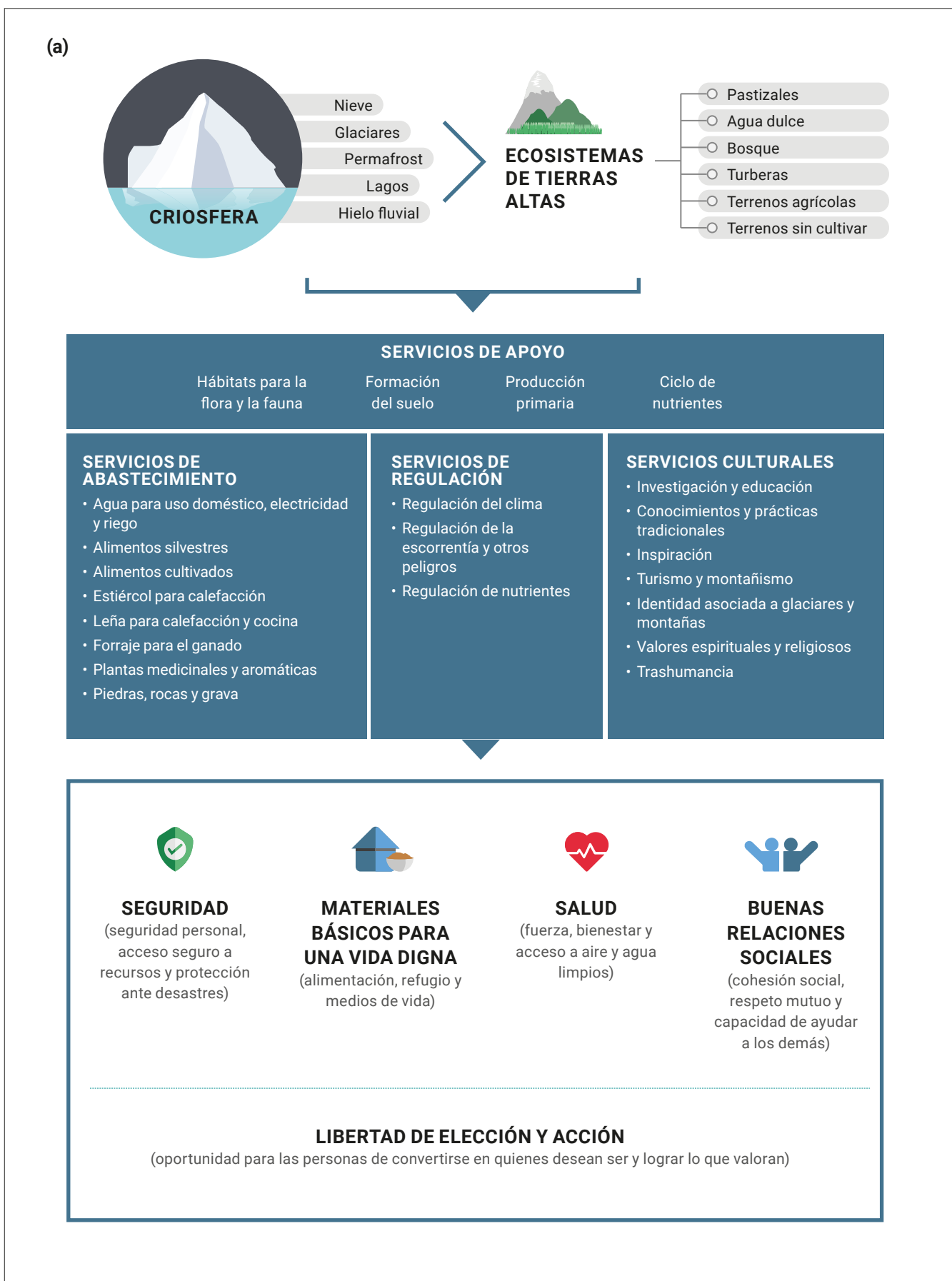
6.2 Tendencias en la criosfera y los servicios ecosistémicos de las montañas

Las regiones de todo el mundo se enfrentan a profundos impactos del cambio climático y de actividades humanas descontroladas, como la deforestación, la agricultura intensiva, la contaminación y la construcción de infraestructura. En las zonas montañosas, estas pueden causar pérdidas irreversibles de biodiversidad y servicios ecosistémicos (FAO/PNUMA, 2023). En 2020, el 57 % de la superficie montañosa a nivel mundial se encontraba bajo una intensa presión; la degradación de los ecosistemas se concentraba en las zonas de menor altitud, donde se lleva a cabo la mayor parte de las actividades humanas (Elsen et al., 2020). Por ejemplo, el aumento de la urbanización y la minería ha degradado varios ecosistemas montañosos (Jiang et al., 2021). La instalación de pistas de esquí requiere una gran remoción de vegetación y suelo, lo que afecta la vegetación nativa y las propiedades estructurales de los suelos (Pintaldi et al., 2017). Las obras hidráulicas mal diseñadas o gestionadas, como la canalización de ríos, pueden provocar la erosión de las riberas y la liberación de sedimentos, lo que impacta en la calidad del agua y la ecología de los ecosistemas acuáticos (Mikuš et al., 2021).

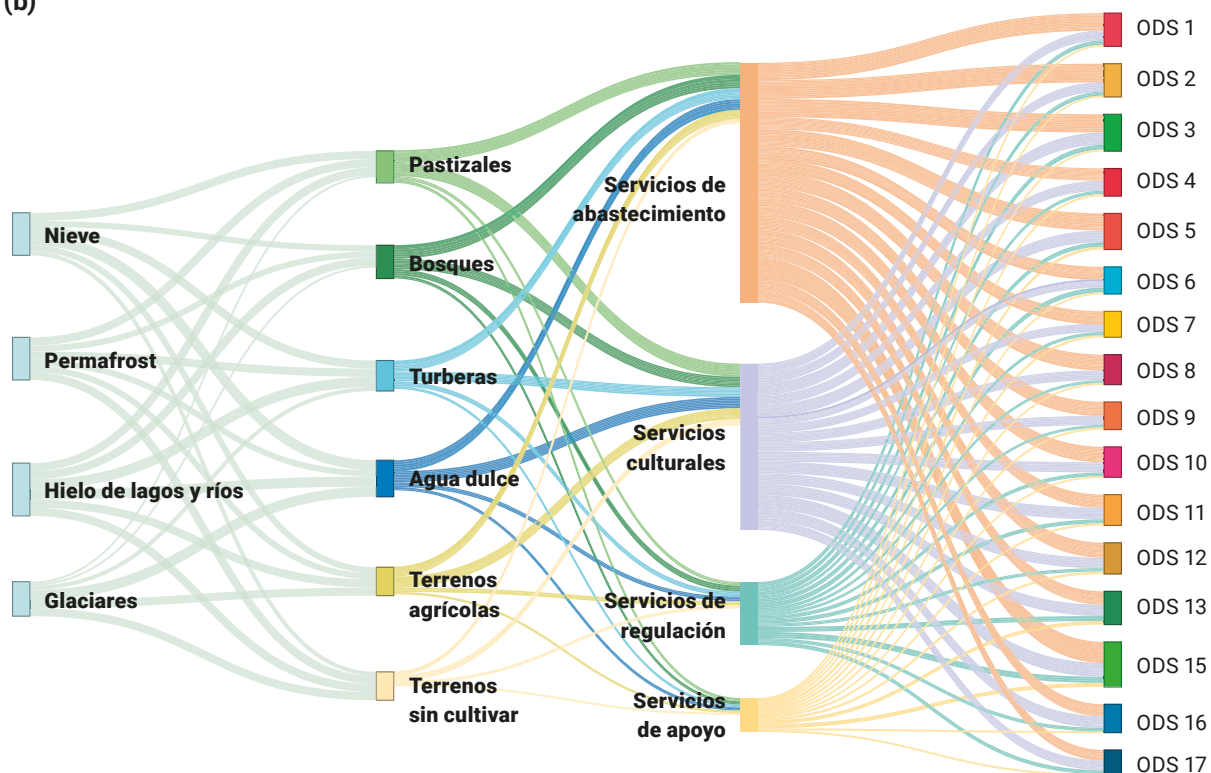
Existe una tendencia al aumento de la frecuencia e intensidad de los riesgos naturales en las zonas glaciares y de alta montaña (véase el capítulo 2). Sin embargo, no todos los peligros en las zonas montañosas se deben al cambio climático. La degradación de los ecosistemas se considera causa o factor que inicia o incrementa el impacto de muchos riesgos. Por ejemplo, la deforestación a gran escala y la mala planificación urbana agravaron un deslizamiento de tierra en Freetown (Sierra Leona) en 2017, que causó la muerte de más de 1000 personas (Kargel et al., 2021).

Más que los impactos directos de las variaciones de temperatura, serán las variaciones hidrológicas las que determinarán los cambios de la mayoría de los ecosistemas montañosos. Se prevé que estos cambios hidrológicos incluyan aumentos a corto y mediano plazo de la escorrentía estacional a medida que la criosfera montañosa se calienta. A largo plazo, estos cambios incluyen una reducción de la escorrentía a medida que disminuye el volumen de agua que almacenan las

Figura 6.1 (a) Servicios ecosistémicos proporcionados por la criosfera montañosa y los ecosistemas de tierras altas; (b) vínculos entre estos servicios y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)



(b)



ODS1: Fin de la pobreza

ODS2: Hambre cero

ODS3: Salud y bienestar

ODS4: Educación de calidad

ODS5: Igualdad de género

ODS6: Agua limpia y saneamiento

ODS7: Energía asequible y no contaminante

ODS8: Trabajo decente y crecimiento económico

ODS9: Industria, innovación e infraestructura

ODS10: Reducción de las desigualdades

ODS11: Ciudades y comunidades sostenibles

ODS12: Consumo y producción responsables

ODS13: Acción por el clima

ODS15: Vida de ecosistemas terrestres

ODS16: Paz, justicia e instituciones sólidas

ODS17: Alianzas para lograr los objetivos

Fuente: Chaudhary et al. (2023, fig. 4.2 y 4.3, pp. 132-134).

montañas, pero con variaciones en el suministro de agua anual total que dependen de los cambios concomitantes en la precipitación (Adler et al., 2022). Por ejemplo, en la Cordillera Real boliviana, donde la cobertura de humedales aumentó durante el período 1984-2011 debido al aumento de los eventos extremos relacionados con las precipitaciones y al derretimiento de los glaciares, es probable que esta tendencia se revierta si, como se prevé, en un futuro disminuirán las precipitaciones totales y la escorrentía de los glaciares (Dangles et al., 2017). Se proyecta que el Gran Jingan, situado en el noreste de China, alrededor del 30 % de la superficie de humedales desaparecerá para 2050, duplicándose este valor para 2100 en un escenario alternativo de cambio climático (Wang et al., 2022). En los Andes neotropicales, se prevé que la superficie del ecosistema de páramo (cuadro 6.1) disminuya en un 30 % para 2050, sin considerar la destrucción causada por el cambio de uso del suelo (Alfthan et al., 2018).

● ● ●
Más que los impactos directos de las variaciones de temperatura, serán las variaciones hidrológicas las que determinarán los cambios de la mayoría de los ecosistemas montañosos

El cambio climático desencadena importantes ciclos de retroalimentación. A medida que los suelos de zonas y latitudes altas experimentan temperaturas del aire más cálidas, el permafrost queda expuesto por el retroceso de los glaciares, y el engrosamiento de la capa activa durante el deshielo genera importantes emisiones de carbono. A menos que se cubran rápidamente con nueva vegetación, los suelos desnudos están sujetos a una mayor erosión y deslizamientos de tierra (FAO, 2022). Según dos escenarios de proyección de cambio climático, el área de permafrost cercana a la superficie podría disminuir hasta un 66 % o un 99 % para 2100. Se proyecta que esto liberará hasta 240 Gt de carbono en forma de dióxido de carbono y metano a la atmósfera, que podrían acelerar significativamente el cambio climático (Meredith et al., 2019).

A medida que las montañas se calientan y la criosfera retrocede, las especies y comunidades ecológicas tienden a desplazarse a zonas más elevadas, lo que resulta en un reverdecimiento generalizado de las zonas montañosas más altas. Esta tendencia puede tener impactos positivos y negativos. *“El calentamiento aumenta la productividad primaria neta, así como la absorción de carbono de la vegetación de la tundra y la montaña, y acelera la respiración, lo que puede provocar un cambio significativo en el ciclo del carbono terrestre y el almacenamiento de carbono en el suelo”* (PNUMA, 2022a, p. 17). El aumento de la cobertura vegetal también fortalece la capacidad de retención de agua del suelo, ya que la capa activa se engrosa con el calentamiento del permafrost y la cobertura vegetal facilita la infiltración. Sin embargo, la desertificación se está expandiendo en algunas regiones donde nacen ríos (ICIMOD, 2023). *“El avance de especies no autóctonas en laderas también es cada vez más común en los ecosistemas montañosos, lo que provoca la supresión [y, en casos extremos, la extinción] de especies autóctonas e impacta la prestación de servicios ecosistémicos”* (FAO/PNUMA, 2023, p. 6).

Si bien el aumento de la temperatura a gran altitud puede contribuir a la expansión de las zonas agrícolas y de plantaciones, puede resultar difícil distinguir entre los impactos del cambio climático y la influencia directa de la actividad humana en estos ecosistemas. Por ejemplo, algunos bosques de la región del HKH han experimentado varias fases de desmonte, conservación y restauración (ICIMOD, 2023). La marcada disminución de las tierras de cultivo en algunas zonas de la región del HKH se ha atribuido a proyectos de protección de pastizales y a la urbanización de las últimas dos décadas (Luan y Li, 2021).

Durante la temporada de deshielo, en los meses de primavera y verano, se han encontrado campos de nieve rojos —conocidos como “sangre de los glaciares” o “nieve sandía”— en todo el mundo, causados por la proliferación de algas rojas. Estas áreas reducen el albedo superficial y mejoran la absorción de energía solar, acelerando así el proceso de derretimiento del hielo y la nieve (Lutz et al., 2015). Las algas de la nieve pueden ser las principales reductoras del albedo en los mantos nivosos húmedos; de la misma manera, las algas del hielo de los glaciares pueden convertirse en el principal reductor del albedo (Halbach et al., 2022). En Norteamérica, por ejemplo, hasta el 65 % de la superficie de los glaciares se vio afectada por floraciones en una temporada de deshielo, lo que se estima que causó hasta 3 cm de agua de deshielo de la nieve equivalente en promedio sobre la superficie del glaciar (Engstrom y Quarmby, 2023). Se supone que esto afectará la calidad del agua de escorrentía, aunque faltan estudios detallados al respecto.

Las observaciones y los modelos indican la influencia del transporte a larga distancia de la contaminación atmosférica. Por ejemplo, los núcleos de hielo y los sedimentos de los lagos han mostrado un aumento significativo de carbono negro (véase cuadro 2.1) y metales pesados como el mercurio desde la década de 1950 en la región del HKH,

6.3 Estrategias de respuesta

lo que refleja el aumento de las emisiones de contaminantes atmosféricos en Asia Meridional (PNUMA, 2022a). Una vez depositado sobre superficies de nieve y hielo, el carbono negro reduce el albedo de dichas superficies (haciéndolas menos reflectantes y más absorbentes de la luz), acelerando así el proceso de derretimiento y aumentando la tasa de retroceso de los glaciares (Kang et al., 2020). Esto facilitará la liberación de contaminantes orgánicos persistentes y metales pesados depositados en la criosfera.

En general, los datos sobre la calidad del agua son particularmente escasos por lo que concierne a las masas de agua de montaña (Machate et al., 2023), a pesar de la amplia difusión de contaminantes en las zonas montañosas, principalmente derivada de actividades agrícolas, urbanas, mineras e industriales (Elsen et al., 2020). Solo existen datos fiables sobre contaminantes orgánicos persistentes, y cada vez hay más pruebas de que incluso los lagos de montaña más remotos están expuestos a una amplia gama de contaminantes orgánicos, lo que genera un alto riesgo de toxicidad crónica para la biodiversidad acuática de las zonas altas (PNUMA, 2022a). Por ejemplo, en las montañas del Cáucaso, se ha descubierto que los ríos georgianos de la cuenca del mar Caspio están contaminados con metales pesados, petróleo y pesticidas debido a las actividades de drenaje de grandes empresas agrícolas y mineras. Se ha reportado contaminación por metales pesados en el río Baksan, que nace en la región del Monte Elbrús de la Federación de Rusia. Asimismo, en el Cáucaso septentrional se ha identificado una mayor concentración de pesticidas en las aguas subterráneas, que constituyen una fuente de aguas minerales (PNUMA, 2024).

Las tendencias de la biodiversidad en las altas montañas muestran un panorama heterogéneo. La biodiversidad a nivel mundial se ve amenazada con una tasa de extinción de aproximadamente el 20 %. Sin embargo, en la región del HKH la tasa es de aproximadamente el 9 % para vertebrados y el 5 % para plantas (PNUMA, 2022a). En la región se han implementado varias iniciativas de conservación exitosas, que han llevado a un aumento de las poblaciones de algunas especies (por ejemplo, la gacela de Przewalski y el asno salvaje tibetano) y una expansión de las áreas protegidas (Fu et al., 2021). En las últimas décadas, ha habido una creciente preocupación en relación con los factores predominantes del cambio, como el cambio climático, la falta de enfoques de conservación a nivel transfronterizo, los grandes proyectos de infraestructura y la llegada y propagación de especies exóticas invasoras (ICIMOD, 2023).

A nivel de ecosistema, la mayoría de las opciones para abordar los impactos de los cambios en la criosfera y la alta montaña implican la conservación o restauración de la funcionalidad del ecosistema para mantener o mejorar los servicios ecosistémicos a escala local y regional mediante soluciones basadas en la naturaleza (SBN) o la adaptación basada en los ecosistemas (ABE). Las SBN para el agua fueron el tema de la edición de 2018 del *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos* (WWAP/ONU-Agua, 2018). La restauración de ecosistemas se aplica cada vez más en las zonas montañosas (FAO/PNUMA, 2023).

Estos enfoques se consideran comúnmente un componente de adaptación en las contribuciones determinadas a nivel nacional de muchos países montañosos de todo el mundo. Según una revisión sistemática de 928 proyectos de SBN evaluados a nivel mundial, el 37 % de ellos se diseñó para abordar las inundaciones y el 28 % para la sequía (PNUMA, 2021a). Una revisión global de 93 SBN aplicadas en zonas de montaña, como las que fomentan la agricultura climáticamente inteligente, la protección de los bosques existentes, la forestación y la agroforestería, confirmó el potencial de las SBN para promover trayectorias sostenibles (Palomo et al., 2021).

• • •
**Donde
componentes
importantes del
ecosistema aún
se encuentran en
relativamente
buen estado, la
acción prioritaria
es su conservación**

Donde componentes importantes del ecosistema aún se encuentran en relativamente buen estado, la acción prioritaria es su conservación. Se pueden obtener múltiples beneficios para las personas vulnerables mediante las siguientes estrategias: la restauración de pastizales utilizando especies nativas para aumentar la resiliencia de las laderas, las oportunidades de pastoreo y la disponibilidad de forraje durante los períodos secos; la conservación y gestión del agua mediante enfoques “grises-verdes”, incluyendo la restauración de zonas ribereñas para reducir las inundaciones y ayudar a mantener la calidad del agua; y el uso de prácticas agrícolas agroecológicas diversificadas para contribuir a mejorar la seguridad alimentaria y los medios de vida (Swiderska et al., 2018).

Se ha investigado mucho sobre las funciones protectoras de los bosques de montaña. Teich et al. (2022) señalaron que los efectos difieren considerablemente entre países, así como la necesidad de definiciones estandarizadas y una mejor comprensión y evaluación de dichas funciones. Se citan ampliamente la seguridad alimentaria, el aumento de la resiliencia y la mitigación del cambio climático como resultados de la agroforestería (Gidey et al., 2020). La ABE ha sido eficaz en las regiones montañosas para reducir los riesgos de inundaciones y deslizamientos de tierra, mejorar la calidad del agua y apoyar la conservación de la biodiversidad (Lavorel et al., 2019). Sin embargo, las perturbaciones recurrentes pueden aumentar los tiempos de recuperación y reducir la eficacia de las SBN y la ABE (Scheidt et al., 2020).

Para la criosfera y las zonas montañosas, una estrategia de respuesta clave es conservar o mejorar la salud y la estabilidad de los suelos —y los servicios ecosistémicos que sustentan— ante las amenazas de la degradación antropogénica o el calentamiento global. Lograr la neutralidad en términos de degradación de las tierras es un objetivo general acordado a nivel mundial, especialmente relevante para las zonas montañosas debido a su vulnerabilidad (cuadro 6.2). Las estrategias que prevén el uso de SBN suelen promover la conservación, restauración o expansión de pastizales a mayor altitud o bosques por debajo de la línea de vegetación arbórea, lo que suele generar múltiples beneficios a nivel local y regional (cuadro 6.3).

Los enfoques regionales suelen centrarse en la gestión del suelo. Por ejemplo, el *Protocolo sobre la Protección de los Suelos* del Convenio de los Alpes hace hincapié en la conservación y restauración del suelo, en particular en lo que respecta a la restauración de zonas de esquí (Repe et al., 2020). Sin embargo, el uso de especies arbóreas no autóctonas que suelen absorber grandes cantidades de agua también puede tener efectos negativos en el suministro de agua (Xiao et al., 2020). Por ejemplo, la forestación en la región montañosa de Chongqing y la meseta de Yunnan-Guizhou, en el suroeste de China, resultó en la absorción de aproximadamente el 10 % del suministro anual de agua, lo que provocó episodios de escasez hídrica en 2015. Si bien los cambios en el uso del suelo, como la forestación y la reforestación, han tenido pequeños efectos inhibitorios sobre el rendimiento hídrico en algunas zonas de tierras bajas del noreste de China, también han tenido importantes impactos positivos en la detención de la erosión del suelo (Wang et al., 2022). También deben considerarse las prácticas de gestión involucradas. Por ejemplo, la gestión forestal puede afectar significativamente el aporte de sedimentos, la pérdida de nutrientes, el transporte de carbono, la liberación de cationes metálicos y básicos, y los cambios en la acidez y la temperatura (Shah et al., 2022).

Cada vez se reconoce más el papel que desempeñan las comunidades locales y sus conocimientos en la identificación de necesidades y la implementación de soluciones. Por ejemplo, en los páramos del centro del Ecuador, las iniciativas comunitarias han demostrado ser mucho más eficaces que un enfoque de áreas protegidas liderado por el gobierno para mejorar el suministro de agua a las poblaciones de las cuencas bajas (Torres et al., 2023).

Cuadro 6.2 Enfoques basados en la neutralización de la degradación de las tierras (NDT) en las montañas

Un marco de resiliencia para la NDT aplicado a nivel nacional contribuye al logro de la meta 15.3 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible: un mundo sin tierras degradadas para 2030. Aplicable a toda la tierra, incluidas las montañas, el marco utiliza un enfoque holístico, inclusivo y basado en el paisaje, regido por salvaguardas sociales y ambientales para proteger a las personas y la naturaleza. Fomenta la aplicación de estrategias a largo plazo, integradas y positivas para la naturaleza, centradas simultáneamente en la mejora de la productividad de la tierra y la rehabilitación, conservación y gestión sostenible de los recursos terrestres e hídricos, lo que garantiza ecosistemas más saludables y mejores medios de vida para las comunidades locales.

Para lograr la NDT es fundamental utilizar la planificación integrada del uso de la tierra y la gestión integrada del paisaje para abordar los compromisos que inevitablemente surgen cuando hay demandas conflictivas sobre la tierra y optimizar la combinación espacial de las intervenciones.

Los impactos positivos demostrados en los ecosistemas de montaña abarcan desde la reducción de la pérdida de suelo y la mejora de la producción y los ingresos a nivel local, hasta un caudal más fiable aguas abajo en épocas de sequía y el control de inundaciones tras fuertes precipitaciones. Hasta noviembre de 2024, 131 países signatarios de la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación habían establecido objetivos de NDT para prevenir la pérdida futura de capital natural terrestre mediante la intensificación de prácticas adecuadas de gestión y restauración de tierras. El marco de resiliencia para la NDT también proporciona una ruta apropiada y positiva para la naturaleza a las naciones que están comprometidas con la preservación de sus regiones montañosas prístinas.

Fuentes: Critchley et al. (2021) y Orr et al. (2017; 2024).

Cuadro 6.3 Acción Andina: restauración del paisaje forestal en los Altos Andes

Las montañas de los Altos Andes albergan ricos ecosistemas forestales que sustentan una diversa fauna y a cientos de millones de personas en Sudamérica. Suministran agua dulce que alimenta las cabeceras del Amazonas y directamente a las aldeas y ciudades cercanas. Siglos de deforestación han reducido los bosques nativos altoandinos a tan solo entre 3 % y 10 % de su extensión original, mientras que el cambio climático ha acelerado el deshielo de los glaciares. Los más vulnerables —los habitantes de los Altos Andes y su singular cultura indígena— se ven afectados de forma desproporcionada.

La ONG Global Forest Generation y la Asociación Ecosistemas Andinos lanzaron Acción Andina en 2018. La iniciativa buscaba proteger y restaurar un millón de hectáreas de ecosistemas forestales altoandinos nativos esenciales de *Polylepis* durante las próximas dos décadas en los siete países andinos (Argentina, Estado Plurinacional de Bolivia, Chile, Colombia, Ecuador, Perú y República Bolivariana de Venezuela). El conocimiento tradicional y la tecnología moderna se integran para restaurar los bosques, asegurar el agua y proteger los paisajes y ecosistemas, la biodiversidad y la cultura.

Se han plantado más de 6,5 millones de árboles nativos en 3 359 ha de bosques altoandinos, con 11 253 ha adicionales de bosques nativos en áreas protegidas nuevas o renovadas. La mayor resiliencia climática y la seguridad hídrica también han mejorado los hábitats de especies nativas como el cóndor andino y el oso de anteojos.

Fuente: FAO/PNUMA (2023).

Cuadro 6.4 Fortalecimiento de la resiliencia de las montañas: restauración de la cuenca de un torrente en las montañas del Pamir en el Afganistán

En la zona montañosa y vulnerable de la cuenca de un torrente en las montañas del Pamir del Afganistán, se ha combinado la intervención física a pequeña escala con la agroforestería o la restauración forestal para proteger a las comunidades locales de deslizamientos de tierra, avalanchas y otros riesgos. Esto también ha aumentado la seguridad hídrica y mejorado los medios de vida en la zona. Las comunidades locales lideraron e implementaron las intervenciones. Se plantaron especies arbóreas locales, incluyendo árboles frutales y nogales, que son cuidados por las mujeres locales y benefician sus medios de vida (PNUMA, 2021b).



Terrazas construidas para estabilizar pendientes y limitar la erosión del suelo

Fotografía: © PNUMA; fuente: PNUMA (2021b, p. 18).



Presas de contención, diques de tierra y plantaciones de árboles para ayudar a estabilizar las pendientes

Fotografía: © PNUMA; fuente: PNUMA (2021b, p. 22).



Un bosque a partir de esquejes de troncos de árboles para proteger terrenos en pendiente

Fotografía: © PNUMA; fuente: PNUMA (2021b, p. 35).

Las SBN, incluidas las estrategias de ABE, suelen combinarse con intervenciones físicas a pequeña escala finalizadas a la realización de infraestructuras de tipo verdegris en zonas montañosas. Por ejemplo, la construcción de terrazas en laderas (véase la sección 3.1.2) para reducir la erosión y los deslizamientos de tierra se suele combinar con la plantación de árboles para mejorar los beneficios generales (cuadro 6.4). Las comunidades locales suelen estar muy motivadas. En algunos casos, es importante disponer de incentivos adicionales (financieros o de otro tipo) para aumentar la participación de la comunidad hasta que los resultados del proceso de restauración se hagan visibles y la sostenibilidad financiera de los medios de vida locales, a través de la creación de fuentes adicionales de ingresos, aumente la eficacia de las SBN (FAO/PNUMA, 2023).

Persisten importantes desafíos; el Centro Internacional para la Ordenación Integrada de las Montañas (ICIMOD, 2023) ha identificado los siguientes:

- las grandes variaciones en los ecosistemas y los cultivos, así como las comunidades locales que dependen en gran medida de los recursos naturales, requieren soluciones específicas para cada área con SBN que consideren intervenciones personalizadas, basadas en la comprensión de los ecosistemas;
- se necesita una ciencia más sólida sobre los ecosistemas montañosos para mejorar la comprensión de las complejas interrelaciones que existen entre el cambio climático, la criosfera, los ecosistemas y la sociedad; la conservación del patrimonio compartido requiere cooperación a nivel regional;
- financiación limitada y brechas en las políticas;
- escasa actividad de intercambio y desarrollo de mejores prácticas;
- seguimiento y datos insuficientes.

Las brechas de conocimiento específicas que requieren atención especial incluyen: la comprensión limitada de las interconexiones a nivel de especies, genético y de ecosistemas, así como de los impactos del cambio climático sobre este aspecto; las interacciones entre el permafrost, los pastizales, los humedales y las turberas; y los riesgos causados por el clima y sus efectos en cascada sobre la extinción de especies y la reducción de las áreas de distribución (ICIMOD, 2023).

Se necesitan estrategias fiables de planificación a largo plazo para zonas industriales y contaminadas que consideren los impactos del cambio climático a fin de evitar futuros riesgos ambientales derivados de dichos factores



Se reconoce más el papel que desempeñan las comunidades locales y sus conocimientos en la identificación de necesidades y la implementación de soluciones

(Langer et al., 2023). La necesidad de resaltar más la importancia de la pesca de altura e incorporarla en las políticas, la gestión y la inversión se reconoce desde hace décadas (FAO, 2003).

Las opciones de respuesta son específicas del contexto y del sitio, a menudo comparten factores facilitadores como el apoyo de la comunidad y los co-beneficios, mientras que en otros casos no se implementan con respecto al cambio climático o a la restauración de los ecosistemas y están débilmente vinculadas a la implementación de políticas nacionales o regionales (PNUMA/GRID-Arendal, 2022).

Se han identificado los siguientes factores clave como importantes para la restauración de los ecosistemas de montaña: la población local y su participación y empoderamiento; enfoques con perspectiva de género y socialmente inclusivos; exploración de la viabilidad y movilización de las partes interesadas; comprensión del contexto del ecosistema y de los medios de vida; análisis de los riesgos climáticos y la vulnerabilidad; comprender el papel que desempeñan los servicios ecosistémicos en el marco de la adaptación; desarrollar SBN o estrategias de ABE y diseñar acciones en consecuencia; monitorear y evaluar para el aprendizaje; e integrar las SBN y la ABE y promover sinergias (Swiderska et al., 2018).

“El firme apoyo de los gobiernos, la sociedad civil y el sector privado es esencial para garantizar y ampliar inversiones adecuadas que favorezcan la naturaleza, conectar las agendas políticas y las acciones para las montañas, impulsar la coordinación regional e implementar el marco de acción mundial del Quinquenio de Acción para el Desarrollo de las Regiones de Montaña” (FAO/PNUMA, 2023, p. 47).

Referencias

- Adler, C., Wester, P., Bhatt, I., Huggel, C., Insarov, G. E., Morecroft, M. D., Muccione, V. y Prakash, A. 2022. Mountains. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösckhe, V. Möller, A. Okem y B. Rama (eds), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribución del Grupo de Trabajo II al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge, Reino Unido/Nueva York, Cambridge University Press, pp. 2273-2318. doi.org/10.1017/9781009325844.022.
- Alfthan, B., Gjerdi, H. L., Puikkonen, L., Andresen, M., Semernya, L., Schoolmeester, T. y Jurek, M. 2018. *Mountain Adaptation Outlook Series: Synthesis Report*. Nairobi/Viena/Arendal, Noruega, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA)/GRID-Arendal. gridarendal-website-live.s3.amazonaws.com/production/documents/s_...document/412/original/SynthesisReport_screen.pdf?1544437610.
- Baruffol, M. 2020. Andean 'Water Sponges': The Role of Plants in Water Supply. Sitio web de los Reales Jardines Botánicos de Kew. www.kew.org/read-and-watch/paramos-andean-water-sponges.
- Chaudhary, S., Chettri, N., Adhikari, B., Dan, Z., Gaire, N. P., Shrestha, F. y Wang, L. 2023. Effects of a changing cryosphere on biodiversity and ecosystem services, and response options in the Hindu Kush Himalaya. P. Wester, S. Chaudhary, N. Chettri, M. Jackson, A. Maharjan, S. Nepal y J. F. Steiner (eds), *Water, Ice, Society, and Ecosystems in the Hindu Kush Himalaya: An Outlook*. Katmandú, Centro Internacional para la Ordenación Integrada de las Montañas (ICIMOD), pp. 123-163. doi.org/10.53055/ICIMOD.1032.
- Critchley, W., Harari, N. y Mekdaschi-Studer, R. 2021. *Restoring Life to the Land: The Role of Sustainable Land Management in Ecosystem Restoration*. Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CLD)/Panorama Mundial de Enfoques y Tecnologías de Conservación (WOCAT). www.unccd.int/sites/default/files/documents/2021-10/211018_RestoringLifetotheLand_Report%20%282%29.pdf.
- Dangles, O., Rabatel, A., Kraemer, M., Zeballos, G., Sorucu, A., Jacobsen, D. y Anthelme, F. 2017. Ecosystem sentinels for climate change? Evidence of wetland cover changes over the last 30 years in the Tropical Andes. *PLoS ONE*, Vol. 12, No. 5, Artículo e0175814. doi.org/10.1371/journal.pone.0175814.
- Elsen, P. R., Monahan, W. B. y Merenlender, A. M. 2020. Topography and human pressure in mountain ranges alter expected species responses to climate change. *Nature Communications*, Vol. 11, Artículo 1974. doi.org/10.1038/s41467-020-15881-x.
- Engstrom, C. B. y Quarmbay, L. M. 2023. Satellite mapping of red snow on North American glaciers. *Science Advances*, Vol. 9, No. 47. doi.org/10.1126/sciadv.adi3268.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2003. *Mountain Fisheries in Developing Countries*. Roma, FAO. www.fao.org/3/y4633e/y4633e.pdf.
- . 2019. *Mountain Agriculture: Opportunities for Harnessing Zero Hunger in Asia*. Bangkok, FAO. www.fao.org/3/ca5561en/CA5561en.pdf.
- . 2022. *El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura: Sistemas al límite*. Informe de síntesis 2021. Roma, FAO. openknowledge.fao.org/items/7786970b-caf5-4af8-bc03-c987a9791b72.
- FAO/PNUMA (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura/Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). 2023. *Restoring Mountain Ecosystems: Challenges, Case Studies and Recommendations for Implementing the UN Decade Principles for Mountain Ecosystem Restoration*. Roma/Nairobi, FAO/PNUMA. doi.org/10.4060/cc9044en.
- Fu, B., Ouyang, Z., Shi, P., Fan, J., Wang, X., Zheng, H., Zhao, W. y Wu, F. 2021. Current condition and protection strategies of Qinghai-Tibet Plateau ecological security barrier. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese version)*, Vol. 36, No. 11, pp. 1298-1306. bulletinofcas.researchcommons.org/journal/vol36/iss11/5/.
- Gidey, T., Oliveira, T. S., Crous-Duran, J. y Palma, J. H. N. 2020. Using the yield-SAFE model to assess the impacts of climate change on yield of coffee (*Coffea arabica* L.) under agroforestry and monoculture systems. *Agroforestry Systems*, Vol. 94, No. 1, pp. 57-70. doi.org/10.1007/s10457-019-00369-5.
- Halbach, L., Chevrollier, L.-A., Doting, E. L., Cook, J. M., Jensen, M. B., Benning, L. G., Bradley, J. A., Hansen, M., Lund-Hansen, L. C., Markager, S., Sorrell, B. K., Tranter, M., Trivedi, C. B., Winkler, M. y Anesio, A. M. 2022. Pigment signatures of algal communities and their implications for glacier surface darkening. *Scientific Reports*, Vol. 12, Artículo 17643. doi.org/10.1038/s41598-022-22271-4.
- ICIMOD (Centro Internacional para la Ordenación Integrada de las Montañas). 2023. *Water, Ice, Society, and Ecosystems in the Hindu Kush Himalaya: An Outlook*. [P. Wester, S. Chaudhary, N. Chettri, M. Jackson, A. Maharjan, S. Nepal y J. F. Steiner (eds)]. Katmandú, ICIMOD. doi.org/10.53055/ICIMOD.1028.
- Jiang, C., Yang, Z., Wen, M., Huang, L., Liu, H., Wang, J., Chen, W. y Zhuang, C. 2021. Identifying the spatial disparities and determinants of ecosystem service balance and their implications on land use optimization. *Science of the Total Environment*, Vol. 793, Artículo 148472. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148472.
- Kang, S., Zhang, Y., Qian, Y. y Wang, H. 2020. A review of black carbon in snow and ice and its impact on the cryosphere. *Earth-Science Reviews*, Vol. 210, Artículo 103346. doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103346.
- Kargel, J. S., Upadhyay, K., Maxwell, A., Ramos, A. G. M., Harrison, S., Shugar, D. H. y Haritashya, U. K. 2021. Part I: Climate Change, Land Use Change, and Mountain Disasters. Sitio web del Georgetown Journal of International Affairs. gja.georgetown.edu/2021/08/23/part-i-climate-change-land-use-change-and-mountain-disasters/.
- Langer, M., Schneider von Deimling, T., Westermann, S., Rolph, R., Rutte, R., Antonova, S., Rachold, V., Schultz, M., Oehme, A. y Grosse, G. 2023. Thawing permafrost poses environmental threat to thousands of sites with legacy industrial contamination. *Nature Communications*, Vol. 14, Artículo 1721. doi.org/10.1038/s41467-023-37276-4.
- Lavorel, S., Colloff, M. J., Locatelli, B., Gordard, R., Prober, S. M., Gabillet, M., Devaux, C., Laforgue, D. y Peyrache-Gadeau, V. 2019. Mustering the power of ecosystems for adaptation to climate change. *Environmental Science & Policy*, Vol. 92, pp. 87-97. doi.org/10.1016/j.envsci.2018.11.010.
- Luan, W. y Li, X. 2021. Rapid urbanization and its driving mechanism in the Pan-Third Pole region. *Science of the Total Environment*, Vol. 750, Artículo 141270. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141270.
- Lutz, S., Anesio, A. M., Field, K. y Benning, L. G. 2015. Integrated 'omics', targeted metabolite and single-cell analyses of Arctic snow algae functionality and adaptability. *Frontiers in Microbiology*, Vol. 6, Artículo 1323. doi.org/10.3389/fmicb.2015.01323.
- Machate, O., Schmeller, D. S., Schulze, T. y Brack, W. 2023. Review: Mountain lakes as freshwater resources at risk from chemical pollution. *Environmental Sciences Europe*, Vol. 35, Artículo 3. doi.org/10.1186/s12302-022-00710-3.
- Meredith, M., Sommerkorn, M., Cassotta, S., Derksen, C., Ekaykin, A., Hollowed, A., Kofinas, G., Mackintosh, A., Melbourne-Thomas, J., Muelbert, M. M. C., Ottersen, G., Pritchard, H. y Schuur, E. A. G. 2019. Polar regions. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama y N. M. Weyer (eds), *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.

- Cambridge, Reino Unido/Nueva York, Cambridge University Press, pp. 203-320. doi.org/10.1017/9781009157964.005.
- Mikuš, P., Wyżga, B., Bylak, A., Kukuła, K., Liro, M., Oglęcki, P. y Radecki-Pawlik, A. 2021. Impact of the restoration of an incised mountain stream on habitats, aquatic fauna and ecological stream quality. *Ecological Engineering*, Vol. 170, Artículo 106365. doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106365.
- Orr, B. J., Cowie, A. L., Castillo Sánchez, V. M., Chasek, P., Crossman, N. D., Erlewein, A., Louwagie, G., Maron, M., Metternicht, G. I., Minelli, S., Tengberg, A. E., Walter, S. y Welton, S. 2017. *Scientific Conceptual Framework for Land Degradation Neutrality. A Report of the Science-Policy Interface*. Bonn, Alemania, Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CLD). www.unccd.int/resources/reports/scientific-conceptual-framework-land-degradation-neutrality-report-science-policy.
- Orr, B. J., Dosdogru, F. y Sánchez Santiviáñez, M. 2024. Land degradation and drought in mountains. S. Schneiderbauer, P. Fontanella Pisa, J. F. Shroder y J. Szarzynski (eds), *Safeguarding Mountain Social-Ecological Systems*. Elsevier, pp. 17-22. doi.org/10.1016/B978-0-12-822095-5.00003-6.
- Palomo, I., Locatelli, B., Otero, I., Colloff, M., Crouzat, E., Cuni-Sánchez, A., Gómez-Baggethun, E., González-García, A., Grêt-Regamey, A., Jiménez-Aceituno, A., Martín-López, B., Pascual, U., Zafra-Calvo, N., Bruley, E., Fischborn, M., Metz, R. y Lavorel, S. 2021. Assessing nature-based solutions for transformative change. *One Earth*, Vol. 4, No. 5, pp. 730-741. doi.org/10.1016/j.oneear.2021.04.013.
- Pintaldi, E., Hudek, C., Stanchi, S., Spiegelberger, T., Rivella, E. y Freppaz, M. 2017. Sustainable soil management in ski areas: Threats and challenges. *Sustainability*, Vol. 9, No. 11, Artículo 2150. doi.org/10.3390/su9112150.
- PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). 2021a. *Adaptation Gap Report 2020*. Nairobi, PNUMA. www.unep.org/resources/adaptation-gap-report-2020.
- . 2021b. *Mountain Resilience: Torrent Catchment Restoration in the Pamir Mountains of Afghanistan*. PNUMA. wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/39982.
- . 2022a. *A Scientific Assessment of the Third Pole Environment*. Nairobi, PNUMA. www.unep.org/resources/report/scientific-assessment-third-pole-environment.
- . 2022b. *Evaluación Mundial de las Turberas: El Estado de las Turberas del Mundo -- Evidencias para la acción hacia la conservación, restauración y gestión sostenible de las turberas*. Main report. Global Peatlands Initiative. Nairobi, PNUMA. wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/41222.
- . 2024. *Caucasus Environment Outlook*. Second edition. Arendal, Noruega/Tiflis/Viena, PNUMA. www.unep.org/resources/report/caucasus-environment-outlook-second-edition.
- PNUMA/GRID-Arendal (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente/GRID-Arendal). 2022. *Mountains ADAPT: Solutions from the South Caucasus*. Nairobi, PNUMA. wedocs.unep.org/xmlui/handle/20.500.11822/39788#:~:text=This%20booklet%20showcases%20adaptation.
- Repe, A. N., Poljanec, A. y Vrščaj, B. (eds). 2020. *Soil Management Practices in the Alps: A Selection of Good Practices for the Sustainable Soil Management in the Alps*. Liubliana, Espacio Alpino Interreg de la EU. www.alpine-space.eu/wp-content/uploads/2022/06/46-1-links4soils-Soil%20Management%20Practices%20in%20the%20Alps%20-%20a%20collection-output.pdf.
- Scheidl, C., Heiser, M., Kamper, S., Thaler, T., Klebinder, K., Nagl, F., Lechner, V., Markart, G., Rammer, W. y Seidl, R. 2020. The influence of climate change and canopy disturbances on landslide susceptibility in headwater catchments. *Science of the Total Environment*, Vol. 742, Artículo 140588. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140588.
- Shah, N. W., Baillie, B. R., Bishop, K., Ferraz, S., Högbom, L. y Nettles, J. 2022. The effects of forest management on water quality. *Forest Ecology and Management*, Vol. 522, Artículo 120397. doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120397.
- Swiderska, K., King-Okumu, C. y Monirul Islam, M. 2018. *Ecosystem-Based Adaptation: A Handbook for EbA in Mountain, Dryland and Coastal Ecosystems*. Londres, Instituto Internacional para el Medio Ambiente y el Desarrollo. www.iied.org/17460iied.
- Teich, M., Accastello, C., Perzl, F. y Berger, F. 2022. Protective forests for ecosystem-based disaster risk reduction (Eco-DRR) in the alpine space. M. Teich, C. Accastello, F. Perzl y K. Kleemayr (eds), *Protective Forests as Ecosystem-based Solution for Disaster Risk Reduction (Eco-DRR)*. IntechOpen. doi.org/10.5772/intechopen.99505.
- Tingley III, R. W., Paukert, C., Sass, G. G., Jacobson, P. C., Hansen, G. J. A., Lynch, A. J. y Shannon, P. D. 2019. Adapting to climate change: Guidance for the management of inland glacial lake fisheries. *Lake and Reservoir Management*, Vol. 35, No. 4, pp. 435-452. doi.org/10.1080/10402381.2019.1678535.
- Torres, M. C., Naranjo, E., Fierro, V. y Carchipulla-Morales, D. 2023. Social technology for the protection of the *Páramo* in the Central Andes of Ecuador. *Mountain Research and Development*, Vol. 43, No. 4, pp. D1-D11. doi.org/10.1659/mrd.2022.00022.
- Wang, H., Wang, W. J., Liu, Z., Wang, L., Zhang, W., Zou, Y. y Jiang, M. 2022. Combined effects of multi-land use decisions and climate change on water-related ecosystem services in Northeast China. *Journal of Environmental Management*, Vol. 315, Artículo 115131. doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115131.
- WWAP/ONU-Agua (Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos /ONU-Agua). 2018. *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018: Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua*. París, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261494.
- Xiao, Y., Xiao, Q. y Sun, X. 2020. Ecological risks arising from the impact of large-scale afforestation on the regional water supply balance in Southwest China. *Scientific Reports*, Vol. 10, Artículo 4150. doi.org/10.1038/s41598-020-61108-w.

Capítulo 7

Perspectivas regionales

7.1 África Subsahariana

WWAP y Oficina de Nairobi de la UNESCO

Matthew England, Richard Connor, Alexandros Makarigakis y Mary Nyasimi

7.2 Europa y Asia Central

CEPE

Jos Timmerman¹ y Hanna Plotnykova²

Con contribuciones de: Nataliia Kruta (Autoridad de Gestión de la Cuenca de los Ríos Bug Occidental y Sian) y Dinara Ziganshina (SIC ICWC)

7.3 América Latina y el Caribe

CEPAL

Silvia Saravia Matus, Alba Llavona, Lisbeth Naranjo, Natalia Sarmanto, Josefa Asmussen y Romeo Moers

7.4 Asia y el Pacífico

CESPAP

Hitomi Rankine y Anshuman Varma

Con contribuciones de: Marisha Wojciechowska, Yi-Ann Chen, Sanjay Srivastava y Nadezhda Dimitrova (CESPAP)

7.5 La región árabe

CESPAO

Ziad Khayat, Marlene Ann Tomaszewicz, Sara Hess, Tracy Zaarour y Dima Kharbotli

¹ Waterframes; ² Secretaría del Convenio del Agua

7.1 África Subsahariana

• • •
Las montañas del África Subsahariana son una fuente crucial de agua para las comunidades de montaña y los usuarios que residen río abajo

África posee el 11 % de la superficie montañosa del mundo, que cubre un área de aproximadamente 1,5 millones de km² (Alweny et al., 2014). El 20 % de la superficie de África continental se clasifica como montañosa con una altitud superior a los 1 000 metros sobre el nivel del mar (m s.n.m.), y un 5 % que supera los 1 500 m s.n.m. (FAO, 2015). África Oriental es la región más montañosa del continente. Las montañas se caracterizan por su alta biodiversidad; además, brindan servicios ecosistémicos, incluyendo recursos hídricos, a millones de personas (Capitani et al., 2019; Trisos et al., 2022). En el África Subsahariana tropical y subtropical, las montañas presentan condiciones ambientales y recursos favorables en comparación con las tierras bajas circundantes, generalmente más secas. Las montañas son importantes zonas de producción agrícola para garantizar la seguridad alimentaria (Romeo et al., 2020).

Esta sección sobre África Subsahariana consta de cuatro partes. La primera presenta las torres de agua de la región, incluyendo su importancia hidrológica para las comunidades de montaña y los usuarios río abajo. La siguiente analiza los desafíos para la sostenibilidad de las torres de agua para almacenar y suministrar agua, incluyendo el impacto humano y el cambio climático. A continuación, se ofrece una visión general de los enfoques y respuestas de gestión, destacando la importancia de los ecosistemas forestales de montaña para la sostenibilidad de las torres de agua. Finalmente, se presentan las conclusiones relativas a la región.

7.1.1 Las torres de agua del África Subsahariana

Las montañas del África Subsahariana (figura 7.1) son una fuente crucial de agua para las comunidades de montaña y los usuarios que residen río abajo. En un continente dominado por zonas áridas y semiáridas, las montañas actúan como torres de agua, generando, almacenando y suministrando agua para la agricultura, las necesidades domésticas e industriales, incluida la energía hidroeléctrica (Viviroli et al., 2007; 2020; PNUMA, 2010; Nsengiyumva, 2019). Las montañas son cruciales para la seguridad hídrica, alimentaria y energética en toda la región.

Las precipitaciones orográficas proporcionan a las montañas de África altos niveles de agua. Esto da lugar a escorrentía superficial, infiltración, flujo y almacenamiento de aguas subterráneas, o bien, a agua almacenada estacionalmente o durante muchos años en forma de nieve y hielo (OMM, 2024a). El agua se almacena en forma de glaciares en las montañas de África Oriental, en la República Democrática del Congo, Kenya, Uganda y la República Unida de Tanzania. Antes de 2019, estos glaciares cubrían una superficie estimada de 4,4 km² (Veettil y Kamp, 2019), proporcionando escorrentía estacional a las cuencas hidrográficas aguas abajo. En el sur de África, las nevadas estacionales se producen en las cumbres de las montañas Drakensburg, en la frontera entre Lesotho y Sudáfrica (Taylor et al., 2016). Mediante la escorrentía superficial, la infiltración y el flujo de aguas subterráneas, el agua se transporta desde las montañas hasta las tierras bajas río abajo.

Las torres de agua africanas son una fuente crucial para los ríos y cuencas transfronterizas de los ríos Congo, Níger, Nilo, Orange, Senegal, Tana y Zambeze. En África Oriental, las tierras altas de Etiopía abastecen de agua al Nilo Azul, lo que contribuye significativamente a su caudal anual (Awange, 2022). En África Occidental, la meseta de Fouta Djallon es una fuente de agua importante para los ríos Gambia, Níger y Senegal (Descroix et al., 2020). La meseta de Jos abastece a numerosos ríos, como el Benue, el Gongola, el Níger y otros que desembocan en el lago Chad. En África Meridional, las tierras altas de Lesotho, incluidas las montañas Drakensberg, son una fuente crucial de agua (PNUMA, 2012). La meseta angoleña es la principal fuente de agua del delta del Okavango (Lourenco y Woodborne, 2023). Las torres de agua de África también son importantes para los recursos hídricos de las tierras bajas, ya que abastecen a diversos usuarios. Por ejemplo, la producción agrícola

Figura 7.1
Torres de agua en África

Nota: en este mapa, la codificación de colores se relaciona con la altura topográfica: marrón y amarillo en las áreas más bajas, verde y blanco en las más altas. Las áreas azules del mapa representan agua dentro de las casillas mapeadas, cada una de las cuales incluye costas o islas.



Fuente: JPL (2004).

y la seguridad alimentaria en las regiones montañosas y las tierras bajas río abajo dependen fuertemente de las aguas de las montañas y de los ecosistemas que proporcionan esos servicios (cuadro 7.1).

7.1.2 Retos

La capacidad de las torres de agua del África Subsahariana para acumular, almacenar y suministrar agua a los usuarios río abajo y a las comunidades de las montañas enfrenta numerosos desafíos, en particular la intensificación de las actividades humanas y los impactos del cambio climático.

Las montañas de la región presentan altas tasas de crecimiento demográfico y densidad de población, la pobreza está extendida y faltan medios de vida alternativos y resilientes. En 2017, las montañas de África albergaban a aproximadamente 252 millones de personas, o sea el 18 % de la población del continente¹⁵, que representa el 23 % de la población de montaña a nivel mundial. África sigue siendo el segundo continente montañoso más poblado después de Asia. En muchas zonas, las montañas están más densamente pobladas que las tierras bajas.

¹⁵ De los 18 millones de personas que vivían por encima de los 2 500 m en África en 2017, 17 millones se encontraban en las tierras altas de África Oriental (Romeo et al., 2020).

Cuadro 7.1 La importancia de las torres de agua de Madagascar para la agricultura

Si bien la agricultura solo contribuye al 20 % aproximadamente del producto interno bruto de Madagascar (Banco Mundial, s.f.), alrededor del 80 % de la población se dedica a esta actividad (Banco Mundial, 2023) para generar ingresos o garantizar su propia subsistencia. Aproximadamente 2,5 millones de explotaciones agrícolas, que en su mayoría pertenecen a pequeños agricultores, dependen del riego continuo para el arroz y otros cultivos (FIDA, s.f.).

En las zonas oriental y septentrional de la isla, varios picos montañosos superan los 2 000 metros sobre el nivel del mar (m s.n.m.; Chaperon et al., 1993). Las partes altas y boscosas de estas montañas absorben las precipitaciones estacionales y las liberan lentamente en la cuenca hidrográfica, lo que sustenta a los agricultores de las tierras bajas y los asentamientos urbanos.

Ubicado en la reserva de Tsaratanana, el monte Maromokotro (2 876 m s.n.m.) da origen a varios ríos importantes. El río Sambirano riega las zonas al oeste para la producción de cacao, arroz y frutas, incluyendo algunos de los productos agrícolas de exportación más importantes de esta nación insular. El río Sofía forma una gran cuenca hidrográfica y es crucial para los agricultores. El aislado macizo de Montagne d'Ambre, una zona protegida en el extremo norte, es la principal fuente de agua potable para las cerca de 200 000 personas que viven en Antsiranana (Goodman et al., 2021) y para la agricultura de la zona circundante.

Las zonas forestales protegidas proporcionan amortiguamiento a nivel local contra los impactos destructivos de ciclones y otros riesgos naturales. Sin embargo, entre 2001 y 2023, la cobertura arbórea de Madagascar disminuyó un 29 % (Global Forest Watch, s.f.). Los cambios en el clima y el uso del suelo (agravados por el crecimiento demográfico) amenazan el futuro de los recursos forestales del país y su biodiversidad, lo que requiere mayores iniciativas de protección y conservación.

Se estima que en 2017 132 millones de personas de zonas rurales de montaña eran vulnerables a la inseguridad alimentaria en África, lo que equivale a dos de cada tres personas del medio rural. Esta cifra representa la mayor proporción de todas las regiones montañosas continentales del mundo (Romeo et al., 2020).

La degradación de los ecosistemas de montaña reduce su capacidad de almacenar y suministrar agua aguas abajo. En particular, este es el caso de la deforestación de bosques montañosos de importancia crítica. También es perjudicial la degradación de la tierra (suelo) por prácticas agrícolas y usos inadecuados del suelo, incluido el impacto de la sobreexplotación de los pastizales (Ariza et al., 2013; Romeo et al., 2020). La minería insostenible y a gran escala ha acelerado la degradación de la tierra y la pérdida de ecosistemas. De la población rural de montaña vulnerable a la inseguridad alimentaria en África en 2017, 86 millones de personas vivían en zonas caracterizadas por una degradación de la tierra que afectaba negativamente a los medios de vida basados en la agricultura (Romeo et al., 2020). La ausencia de un seguimiento y datos hidrometeorológicos exhaustivos dificulta considerablemente la comprensión y la urgencia de restaurar las zonas boscosas a su estado primario.

Los efectos del cambio climático hacen que el reto de gestionar la variabilidad estacional de las precipitaciones en el África Subsahariana sea cada vez más complicado (Trisos et al., 2022; OMM, 2022). Las proyecciones para el continente, incluidas las regiones montañosas, indican un incremento de la variabilidad de las precipitaciones a escala anual e intraanual, un aumento de la temperatura y el deshielo de los glaciares. Se prevé que la variabilidad hidrológica extrema se amplifique progresivamente en todos los escenarios de cambio climático (Trisos et al., 2022). Para 2050, hasta 921 millones de personas en el África Subsahariana podrían estar expuestas a estrés hídrico relacionado con el cambio climático (Dickerson et al., 2021). Se prevé un aumento de las inundaciones, las sequías y otros riesgos naturales, tanto en las montañas como en los valles. Además, la frecuencia

• • •
La frecuencia y los niveles de precipitaciones que llegan a las montañas son de vital importancia para la sostenibilidad de las torres de agua del África Subsahariana

de los corrimientos de tierras muestra tendencias al alza en las regiones montañosas de África (Adler et al., 2022). Los datos sugieren que las catástrofes debidas a sequías, plagas y cambios en los regímenes de precipitaciones repercuten negativamente en los medios de vida agrícolas de los pequeños agricultores (Shikuku et al., 2017).

El deshielo de los glaciares se ha observado en las montañas de África Oriental (Trisos et al., 2022), con una pérdida de masa estimada del 80 % entre 1990 y 2015 (CAO/PNUMA/GRID-Arendal, 2016). Por ejemplo, la superficie glaciar total del monte Kenia disminuyó un 44 % durante 2004-2016 (Prinz et al., 2016), la del monte Kilimanjaro pasó de 4,8 km² en 1984 a 1,7 km² en 2011 (Cullen et al., 2013) y la de las montañas Rwenzori de 2 km² aproximadamente en 1987 a alrededor de 1 km² en 2003 (Taylor et al., 2016). La reducción de la superficie de los glaciares está vinculada al aumento de la temperatura del aire y, en el caso del monte Kenia y el monte Kilimanjaro, a la disminución de las precipitaciones y la humedad atmosférica (Veettil y Kamp, 2019). Se prevé que los glaciares desaparezcan antes de 2030 en el monte Kenia y las montañas Rwenzori, y antes de 2040 en el monte Kilimanjaro (Trisos et al., 2022).

Se ha pronosticado que el impacto de la desaparición de los glaciares en los recursos hídricos de África Oriental será mínimo (Taylor et al., 2009; Adhikari et al., 2015; Veettil y Kamp, 2019) a escala regional (macro), ya que el agua de los glaciares contribuye relativamente poco al caudal total de los ríos. Por ejemplo, en las montañas Rwenzori, entre la República Democrática del Congo y Uganda, los glaciares han contribuido con menos del 2 % a la escorrentía total de los principales ríos durante las estaciones seca y húmeda (Taylor et al., 2009). Sin embargo, se han observado impactos estacionales localizados en los recursos hídricos. Por ejemplo, alrededor del monte Kilimanjaro, muchos canales de las estribaciones se han secado y los niveles de agua de los arroyos han ido disminuyendo, lo que ha provocado conflictos locales por el acceso al agua (Gagné et al., 2014).

La frecuencia y los niveles de precipitaciones que llegan a las montañas son de vital importancia para la sostenibilidad de las torres de agua del África Subsahariana. Las precipitaciones se almacenan en las montañas y se suministran desde ellas, en forma de escorrentía de aguas superficiales, fluviales y subterráneas, a los valles aguas abajo. En un contexto regional, en África Oriental las precipitaciones tienen más importancia que el deshielo de los glaciares en términos de volumen de agua destinado a alimentar el caudal de los ríos aguas abajo. Según los pocos estudios que han examinado las proyecciones pluviométricas específicamente para las zonas montañosas, se prevé que África Oriental reciba entre un 5 % y un 20 % más de precipitaciones anuales durante el siglo XXI, aunque con un nivel de confianza medio (Adler et al., 2022). Por lo demás, en el resto del continente, las previsiones de precipitaciones según los escenarios de cambio climático predicen un aumento de la variabilidad anual e intraanual, que difiere en cada subregión (Trisos et al., 2022).

Un estudio ha examinado cómo el cambio climático (a través de la variabilidad de las precipitaciones) y el uso del suelo generan escorrentía de agua en nueve torres de agua de África Oriental. Los resultados indicaron que la escorrentía del agua es más sensible al cambio climático (precipitaciones) que al cambio del uso del suelo. Sin embargo, en el caso de las tierras bajas circundantes, los efectos del cambio de uso del suelo tuvieron mayor repercusión en la escorrentía que el cambio climático. Las torres de agua de África Oriental han experimentado un fuerte cambio hacia condiciones más húmedas, especialmente en el periodo 2011-2019, mientras que la evapotranspiración potencial ha aumentado gradualmente. Teniendo en cuenta que la mayoría de las torres de agua fueron identificadas como no resistentes a estos cambios, es probable que en un futuro la escorrentía de agua también experimente variaciones más extremas (Wamucii et al., 2021).

● ● ●
Se prevé que el cambio climático aumente la alta variabilidad estacional histórica de las precipitaciones en toda el África Subsahariana

7.1.3 Estrategias de respuesta

Se han propugnado numerosas estrategias de respuesta para promover una gestión sostenible del agua en las montañas frente al cambio climático y también a la intensificación de las actividades humanas (Adler et al., 2022; Trisos et al., 2022).

Teniendo en cuenta que la agricultura es el principal medio de vida en las montañas del África Subsahariana, es de vital importancia mejorar las prácticas agrícolas para reducir la degradación de la tierra (conservación del suelo; Romeo et al., 2020). Promover la adaptación basada en los ecosistemas (ABE; por ejemplo, la reforestación y la conservación de los bosques montanos que reducen la erosión del suelo) puede mejorar la retención de agua y la recarga de los acuíferos y disminuir el riesgo de peligros (Alweny et al., 2014; Nsengiyumva, 2019).

Teniendo en cuenta la alta proporción de ríos transfronterizos en África abastecidos por torres de agua, la promoción de la cooperación en materia de aguas superficiales y subterráneas entre ribereños es una estrategia eficaz para promover la distribución equitativa de los beneficios en todo el continente (Naciones Unidas, 2024).

Importancia de los ecosistemas forestales para las torres de agua del África Subsahariana

El interés por las torres de agua (a escala mundial) se ha centrado en las montañas que albergan glaciares, donde la temperatura es un factor clave para determinar la escorrentía del agua de las cadenas montañosas con glaciares (Immerzeel et al., 2020). Las montañas boscosas y otros tipos de vegetación, como la hierba, proporcionan servicios similares (Viviroli y Weingartner, 2004). Los bosques de montaña pueden captar, almacenar y purificar el agua, y liberarla a las zonas bajas (PNUMA, 2014).

Las torres de agua de África Oriental cuentan con extensos ecosistemas forestales montanos. Entre ellos se encuentran el Rift Albertino, las tierras altas de Etiopía y las de Kenya (Wamucii et al., 2021). Estos bosques se caracterizan por su gran altitud y humedad, y acumulan, almacenan y suministran agua a las zonas de tierras bajas (PNUMA, 2010). Los bosques montanos mitigan las inundaciones y las sequías, evitan la erosión del suelo, mantienen la calidad del agua, aumentan la infiltración de aguas subterráneas e influyen en el microclima de los bosques y sus alrededores (Mwangi et al., 2020).

Las torres de agua de Kenya se caracterizan por los bosques montanos de las cuencas altas de la Cordillera de Aberdare, las colinas de Cherangani, el complejo forestal de Mau, el monte Elgon y el monte Kenia. Son recursos naturales de valor incalculable que sustentan el suministro de agua, la producción de energía, la economía basada en la agricultura y la preservación y conservación de la biodiversidad del país (Kiplagat et al., 2011; Nyingi et al., 2013; Kanui et al., 2016; Ontumbi y Sanga, 2018; Schmitz, 2020; Takase et al., 2021).

Las montañas boscosas son las fuentes de muchos de los ríos de Kenya y proporcionan aproximadamente el 75 % de los recursos hídricos del país, que se utilizan para el regadío, las necesidades industriales y la energía hidroeléctrica (que genera el 60 % de la electricidad de Kenya). Sin embargo, los bosques se están degradando por los asentamientos humanos no planificados, la sobreexplotación de los pastizales, la deforestación y la conversión de tierras forestales a uso agrícola. Por ejemplo, se calcula que el bosque de Mau, una de las mayores cuencas hidrográficas de Kenya, perdió una cuarta parte de su cubierta forestal entre 2000 y 2020. Esta deforestación amenaza la biodiversidad de estos bosques y también altera los servicios ecosistémicos que prestan. Las colinas de Cherangani y el monte Elgon también están experimentando una degradación similar, lo que agrava aún más el problema (Mwangi et al., 2020).

7.2 Europa y Asia Central

Los esfuerzos para conservar y restaurar estas torres de agua esenciales incluyen prácticas de gestión forestal sostenible, proyectos de reforestación y políticas que aborden las causas subyacentes de la deforestación, como la pobreza y los problemas de tenencia de la tierra. También se aboga por mejorar la participación, la transferencia de conocimientos y la capacitación de las partes interesadas, y por centrarse en cadenas de valor específicas (por ejemplo, maíz, té y ganado) para promover la resiliencia de los medios de subsistencia (Mwangi et al., 2020). Involucrar a las comunidades locales (incluidas las mujeres, las jóvenes generaciones y los pueblos indígenas) en los esfuerzos de conservación y promover medios de vida alternativos también puede ayudar a reducir la presión sobre estos bosques (Kennedy et al., 2023).

7.1.4 Conclusiones

Esta sección ha ilustrado la importancia de las torres de agua del África Subsahariana para las comunidades de montaña y los usuarios aguas abajo. La conservación y rehabilitación de bosques, suelos y otros servicios ecosistémicos relacionados son de vital importancia para la sostenibilidad de las torres de agua de la región. Se prevé que el cambio climático aumente la alta variabilidad estacional histórica de las precipitaciones en toda el África Subsahariana. Por tanto, una adaptación mutuamente beneficiosa (que incluya medidas autónomas, de bajo riesgo y bajo arrepentimiento) adquiere una importancia aún mayor para adaptarse a la estacionalidad y atemperar el impacto medioambiental humano en las montañas, salvaguardando así el suministro de las torres de agua.

Las cadenas montañosas son la fuente de agua de muchos ríos de la región. La nieve alpina y el deshielo de los glaciares garantizan una lenta liberación de agua a las zonas aguas abajo. Sin embargo, el cambio climático está adelantando el deshielo estacional y reduciendo los glaciares, lo que amenaza la disponibilidad de agua en la estación estival. Esto tiene graves consecuencias para las poblaciones de las cuencas aguas abajo.

Por ejemplo, el río Colorado, en Norteamérica, que abastece a unos 40 millones de personas, obtiene la mayor parte de su agua de las nevadas de las Montañas Rocosas. La cuenca del río, ya de por sí estresada por la sobreexplotación, está en sequía desde el año 2000. La situación puede verse agravada por unas temperaturas más cálidas, que están provocando que caiga más precipitación en forma de lluvia, que se escurre más rápidamente que la nieve de las montañas (Robbins, 2019).

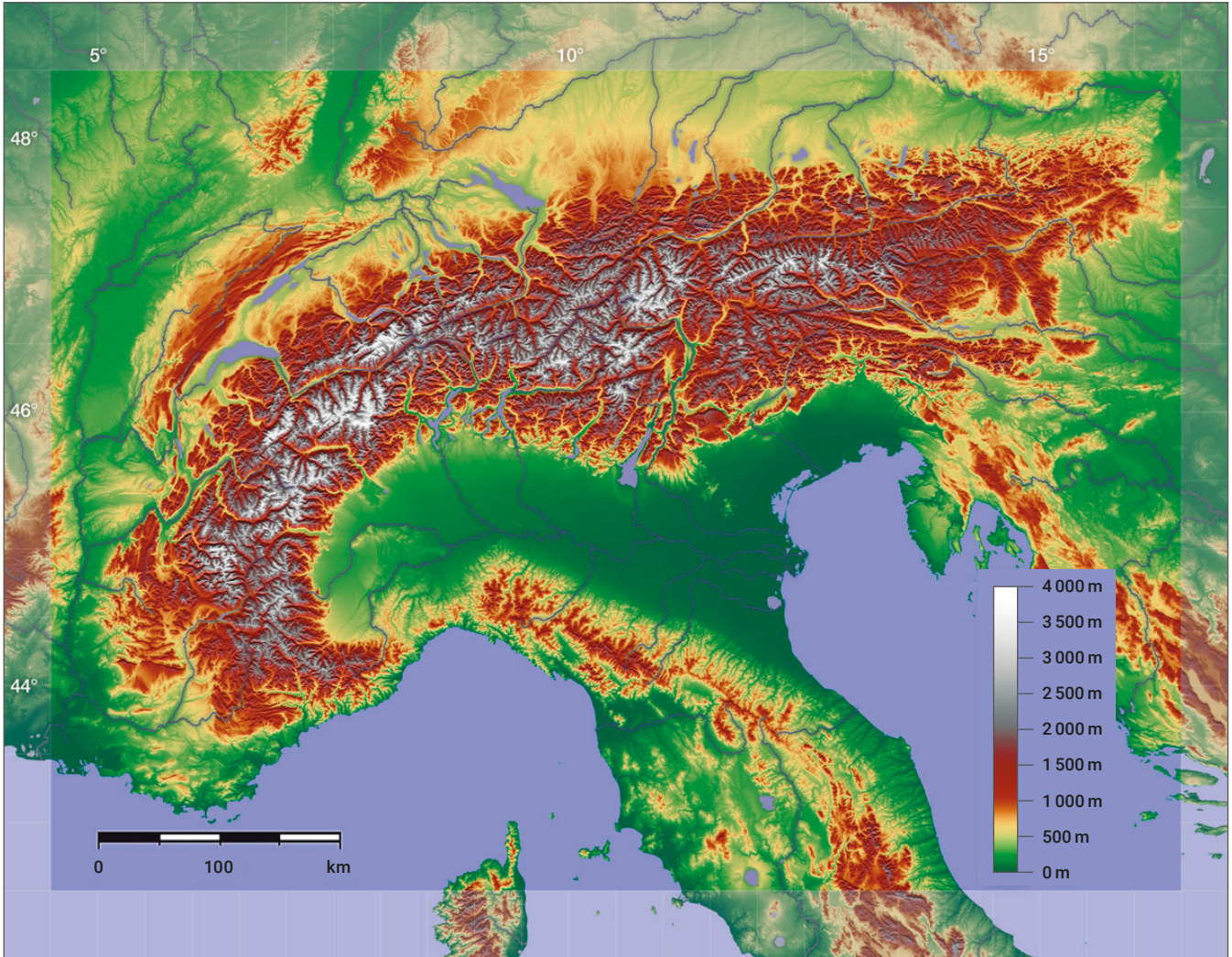
Las montañas son zonas social y ecológicamente importantes. Están sujetas a muchas influencias antropogénicas que también afectan a la hidrología de la zona y, en consecuencia, a la disponibilidad de agua aguas abajo. Por lo tanto, es necesario actuar para evitar una mayor degradación de las montañas y preservar su valor social y ecológico, así como su función como torres de agua. Dado que las cadenas montañosas abarcan varios países, es necesaria la cooperación entre ellos para garantizar una gestión adecuada. A continuación, se describen estas cuestiones en relación con algunas cadenas montañosas de la región de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa¹⁶.

¹⁶ La Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa incluye 56 Estados Miembros de Europa, Norteamérica y Asia (unece.org/member-states).

7.2.1 Los Alpes

Los Alpes abarcan ocho países (Alemania, Austria, Eslovenia, Francia, Italia, Liechtenstein, Mónaco y Suiza) y alimentan cuatro grandes ríos (el Danubio, el Po, el Rin y el Ródano; figura 7.2). Las aguas de los Alpes son de vital importancia para gran parte de Europa (Secretaría Permanente del Convenio de los Alpes, 2009a).

Figura 7.2 Mapa topográfico de los Alpes



Fuente: Ghosh (2021).

Los ecosistemas alpinos y la biodiversidad son importantes para la salud de los recursos hídricos. Los cambios en el uso del suelo están dando lugar a hábitats más pequeños y fragmentados, mientras que el cambio climático está ejerciendo presión sobre los paisajes naturales, lo que provoca la degradación de los hábitats y la pérdida de especies, ejerciendo así presión sobre los recursos hídricos (Secretaría Permanente del Convenio de los Alpes, 2009a). Se prevé que de aquí a 2100 los efectos del cambio climático en la criosfera y la hidrosfera de los Alpes provoquen una disminución de la descarga fluvial anual; en particular, se calcula una reducción del 45 % de la escorrentía procedente de las áreas cubiertas de hielo y del 35 % de la escorrentía total en comparación con 2006. Esto tendrá importantes repercusiones aguas abajo sobre la cantidad y la calidad del agua, afectando a la energía hidroeléctrica, la agricultura, la silvicultura, el turismo y los ecosistemas acuáticos (Laurent et al., 2020).

● ● ●
Las aguas de los Alpes son de vital importancia para gran parte de Europa

La generación de energía hidroeléctrica es el principal motivo de extracción de agua en los Alpes. Otros usos son los industriales, para el riego agrícola y la fabricación de nieve. Estas actividades conllevan alteraciones morfológicas y, como consecuencia, es posible que 16 de cada 50 masas de agua no se encuentren en buen estado ecológico en 2027 (Secretaría Permanente del Convenio de los Alpes, 2009b).

Hay que apoyar y promover la gestión integrada de riesgos y la detección precoz de peligros potenciales relacionados con el cambio climático, como avalanchas, inundaciones, flujos de lodo y corrimientos de tierra. La innivación artificial puede ser una importante estrategia de adaptación para potenciar el turismo invernal y reducir el deshielo de los glaciares, pero puede provocar conflictos entre los usuarios de los sistemas de innivación y los hogares y otros usuarios del agua. La innivación artificial debería evitarse, especialmente en hábitats ecológicamente sensibles y en peligro de extinción. A nivel local, se han utilizado mantas aislantes para reducir el deshielo de los glaciares (cuadro 7.2; Secretaría Permanente del Convenio de los Alpes, 2009a; Jorio y Reusser, 2019).

Cuadro 7.2 Protección de los glaciares con mantas aislantes

Desde hace más de diez años, el glaciar del Ródano, en el Valais suizo, está cubierto de sábanas blancas destinadas a protegerlo de los rayos del Sol. El objetivo es preservar la gruta de hielo, una de las grandes atracciones turísticas de los Alpes. Este planteamiento es útil a pequeña escala, cuando el objetivo es frenar el deshielo a escala local por razones económicas. No está pensado para salvar un glaciar entero. Los costes pronto superarían los beneficios económicos. Se calcula que harían falta entre 10 y 100 millones de euros al año para cubrir todo el glaciar (Jorio y Reusser, 2019).



Lonas de protección sobre el glaciar del Ródano

Fotografía: © Zoltan Major/Shutterstock*.

El Convenio de los Alpes fue adoptado en 1991 por los ocho países atravesados por los Alpes con el objetivo de promover el desarrollo sostenible y la protección de toda la cordillera. Periódicamente se publican informes sobre el estado de los Alpes, para contribuir activamente al debate sobre el desarrollo ecológico, económico y social de los Alpes. Para el séptimo informe, la Plataforma de Riesgos Naturales del Convenio de los Alpes preparó un análisis del *statu quo* y recomendaciones para la mejora de la gobernanza del riesgo con el fin de examinar los cambios en la forma en que la sociedad afronta los riesgos naturales. Se prevé un aumento de la frecuencia de peligros como desprendimientos de rocas, desestabilización de las lenguas glaciares, inundaciones por desbordamiento repentino de lagos glaciares y avalanchas de hielo asociadas al retroceso de los glaciares y del permafrost (véase la sección 2.2.3; Secretaría Permanente del Convenio de los Alpes, 2019). El Convenio de los Alpes también ha desarrollado el Plan de Acción por el Clima 2.0 para lograr unos Alpes neutros y resilientes con respecto al clima para 2050 como una forma importante de proteger el medio ambiente de montaña y reducir el deshielo de los glaciares (Secretaría Permanente del Convenio de los Alpes, 2022).

La Comisión Internacional para la Protección del Rin, a través de la Comisión Internacional para la Hidrología de la Cuenca del Rin, monitorea los glaciares que alimentan el río Rin. En su labor de actualización de su estrategia de adaptación al cambio climático, la comisión señala que se prevé que la proporción de nieve y agua de deshielo de los glaciares que estabiliza el caudal del Rin durante el estiaje disminuya como consecuencia del cambio climático, y que, por lo tanto, es necesario restaurar los sistemas hídricos naturales, como los bosques, los humedales y las llanuras aluviales, en el Rin y su cuenca hidrográfica (CHR, 2022; ICPR, 2022).

7.2.2 Los Cárpatos

La región de los Cárpatos está compartida por Chequia, Eslovaquia, Hungría, Polonia, Rumanía, Serbia y Ucrania. Los Cárpatos albergan aproximadamente el 30 % de la flora europea y las mayores poblaciones de oso pardo, lobo, lince, bisonte europeo y especies de aves raras de Europa. Los hábitats seminaturales, como los pastos de montaña y los prados de heno, son de gran importancia ecológica y cultural. La región de los Cárpatos proporciona importantes bienes y servicios ecosistémicos, como alimentos, agua dulce, productos forestales y turismo. La región alimenta tres cuencas fluviales principales: el Danubio y el Dniéster, que desembocan en el Mar Negro, y el Vístula, que desemboca en el Mar Báltico (PNUMA, 2023a; Climate-ADAPT, 2024).

El abandono de tierras, la conversión y fragmentación del hábitat, la deforestación y las prácticas forestales y agrícolas insostenibles provocan un aumento de la escorrentía y la erosión, y amenazan la biodiversidad en las montañas. La agricultura es la principal fuente de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas (Climate-ADAPT, 2024). El cambio climático está provocando temperaturas más altas y un aumento en la frecuencia e intensidad de las olas de calor estivales. Se prevé un cambio en los patrones de precipitación: una menor precipitación en verano provocará una reducción del caudal fluvial y una mayor escasez de agua, y lluvias más intensas y de corta duración, con un mayor riesgo de inundaciones, erosión y deslizamientos de tierra que afectarán los medios de vida y los asentamientos. Las temporadas de nieve se acortarán, lo que amenazará el turismo invernal local, pero extenderá la temporada de crecimiento de los cultivos agrícolas. El deshielo prematuro reducirá el caudal fluvial, el suministro de agua potable en verano y la recarga de acuíferos, y aumentará el riesgo de incendios forestales (Alberton et al., 2017).

● ● ●
**Los Cárpatos
albergan
aproximadamente
el 30 % de la flora
europea**

La invasión a gran escala de Ucrania por parte de la Federación de Rusia ha afectado drásticamente a la región de los Cárpatos. Está ejerciendo una presión considerable sobre los recursos naturales debido a la contaminación causada por la destrucción de infraestructuras (por ejemplo, el vertido de productos petrolíferos en las cuencas del Dniéster y el Vístula debido a ataques militares contra depósitos de petróleo y centrales eléctricas [Shumilova et al., 2023; Autoridad de Gestión de la Cuenca del Dniéster, 2024; Autoridad de Gestión de la Cuenca de los Ríos Bug Occidental y Sian, inédito]). Los bosques también se ven afectados por el aumento del consumo de leña debido a las interrupciones en el suministro de combustibles líquidos y electricidad, lo que incrementa el riesgo de inundaciones. La guerra también plantea importantes desafíos para la gestión de las áreas protegidas, por ejemplo, mediante una reducción considerable de la financiación para la conservación y una reducción de personal debido a la movilización militar (Ministerio de Clima y Medio Ambiente de Polonia, 2022; PNUMA, 2022a).

Es necesario aumentar la integración entre el uso del suelo y la gestión del agua para garantizar la sostenibilidad de los recursos naturales. Esto incluye la protección de los ecosistemas, una mayor atención a la retención y el almacenamiento de agua en los suelos, la captación de agua de lluvia, la prevención de la erosión superficial, especialmente en tierras agrícolas, la prevención de la degradación forestal y la adaptación de la gestión de la infraestructura hídrica existente. También es necesaria la prevención y preparación ante inundaciones y deslizamientos de tierra, incluyendo la elaboración de mapas de inundaciones y mapas integrados de zonas de riesgo. Los países de los Cárpatos han incluido muchas de estas medidas en sus estrategias ambientales nacionales (Alberton et al., 2017).

El Convenio Marco sobre la Protección y el Desarrollo Sostenible de los Cárpatos (Convenio de los Cárpatos), un acuerdo ambiental multinacional firmado por los siete países de los Cárpatos que entró en vigor en 2003, tiene como objetivo proteger el patrimonio natural y cultural de la región de los Cárpatos, promoviendo al mismo tiempo el desarrollo sostenible. Las partes interesadas locales y los representantes de la comunidad pueden participar en las reuniones del convenio como observadores. También participan en el llamado Día de los Cárpatos, organizado en conjunto con la Conferencia de las Partes del Convenio de los Cárpatos. Por ejemplo, el convenio ha propiciado el establecimiento de un sitio Ramsar transfronterizo en el Parque Nacional de Đerdap (que alberga la Garganta de la Puerta de Hierro) y ha mejorado la protección de los bosques de montaña. La adaptación al cambio climático también se está integrando en otras áreas de políticas, como la gestión del uso del suelo, la agricultura y el turismo (PNUMA, 2023a; Climate-ADAPT, 2024).

El Convenio de los Cárpatos también colabora estrechamente con la Comisión Internacional para la Protección del Río Danubio (Comisión Internacional para la Protección del Río Danubio, 2014). Por ejemplo, el estudio sobre la adaptación al clima del Danubio (Ludwig-Maximilians-Universität de Múnich, 2018) considera los impactos del cambio climático en los Cárpatos, y el Plan de Gestión del Riesgo de Inundación del Danubio (Comisión Internacional para la Protección del Río Danubio, 2021) incluye medidas de gestión del riesgo de inundaciones en la región de los Cárpatos que posteriormente se traducen en prácticas para su implementación por los países a nivel nacional.

La dimensión de los Cárpatos también se refleja claramente en las actividades de la Comisión para el Uso Sostenible y la Protección de la Cuenca del Río Dniéster (Comisión del Dniéster). Por ejemplo, su Grupo de Trabajo sobre los Ecosistemas y la Biodiversidad presta especial atención a la región de los Cárpatos mediante la adopción de medidas para la conservación y el aumento de los recursos forestales

• • •
Las montañas de Asia Central son una importante fuente de agua dulce para la energía hidroeléctrica, el riego, el agua potable y la producción industrial

y los pequeños ríos con el fin de mejorar el almacenamiento de agua (Comisión del Dniéster, 2024a). Su Grupo de Trabajo sobre Emergencias ha identificado algunas áreas prioritarias en los Cárpatos y ha realizado modelos y mapas de riesgo de inundaciones, seguidos por el desarrollo de planes de gestión del riesgo de inundaciones de acuerdo con la Directiva sobre las inundaciones de la Unión Europea (2007/60/EC) sobre la evaluación y gestión del riesgo de inundaciones (Comisión del Dniéster, 2024b).

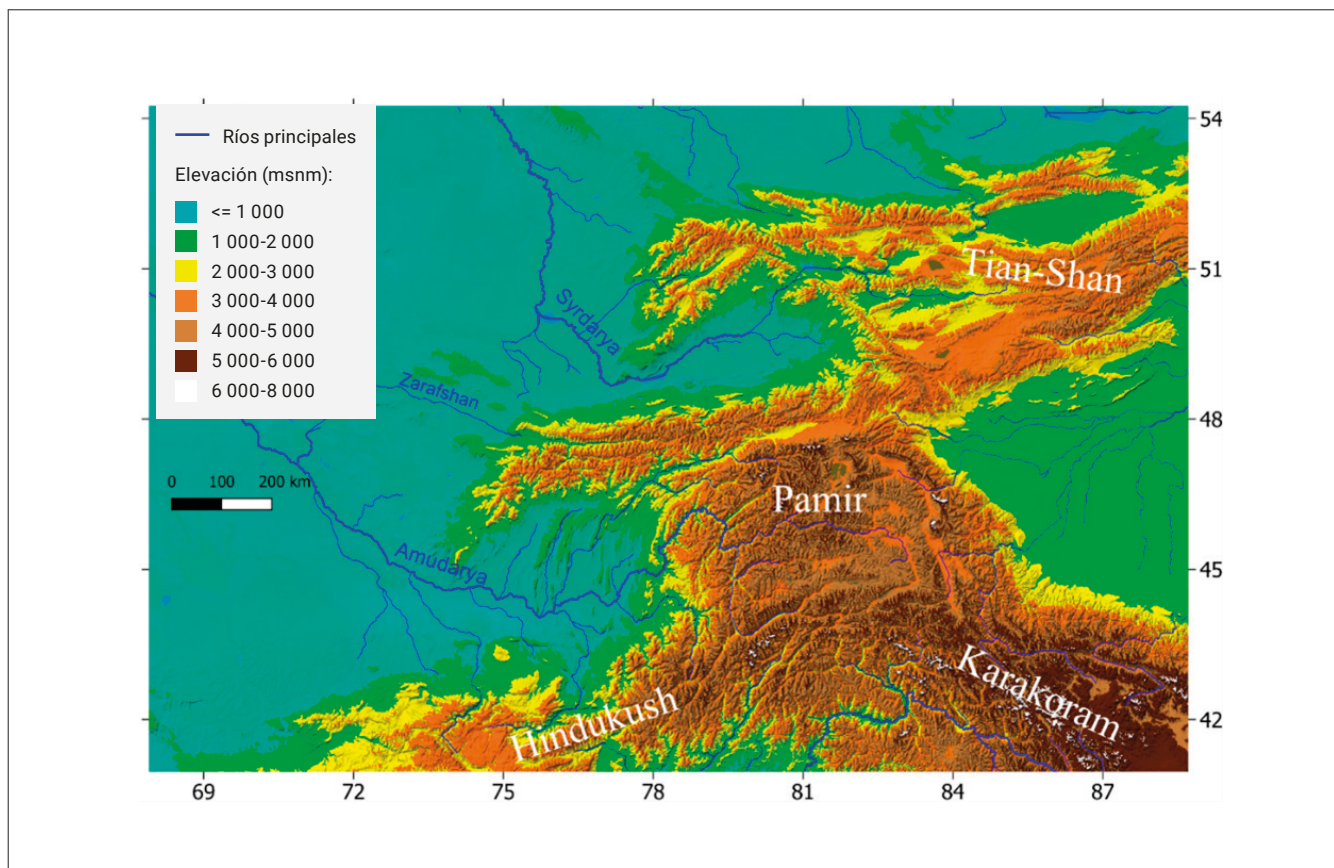
7.2.3 Asia Central

Las montañas de Asia Central incluyen las Cordilleras del Pamir y Tian Shan, que abarcan partes de Afganistán, China, Kazajistán, Kirguistán, Tayikistán y Uzbekistán (figura 7.3), y la Cordillera del Karakórum, que abarca China, India y Pakistán. Estas montañas contienen glaciares; son ecosistemas frágiles y valiosos para la identidad social y cultural de sus habitantes. La Cordillera de Tian Shan es conocida como la fuente de agua de Asia Central. Las montañas de Asia Central son una importante fuente de agua dulce para la energía hidroeléctrica, el riego, el agua potable y la producción industrial. La cuenca del Mar de Aral, que abarca gran parte de la zona, alberga a más de 60 millones de personas. La agricultura es responsable de hasta el 90 % de la extracción total de agua en dicha cuenca (Alford et al., 2015).

Kirguistán y Tayikistán dependen en gran medida de la energía hidroeléctrica: casi el 90 % de su electricidad proviene de la producción de energía hidroeléctrica. Estos países, ubicados aguas arriba, experimentan escasez de energía en invierno y desean ampliar su producción de energía hidroeléctrica (Zandi, 2023). Los países ubicados aguas abajo, como Kazajistán, Turkmenistán y Uzbekistán, dependen en gran medida de las aguas de las montañas para su producción agrícola en verano. Por ejemplo, el 80 % del caudal del Amu Daria y el 74 % del Syr Daria, que en conjunto proporcionan el 90 % del agua de los ríos de Asia Central, se forman en las montañas de Kirguistán y Tayikistán (Russell, 2018). Este conflicto en las demandas estacionales de agua genera tensiones políticas entre los países ribereños (Pohl et al., 2017; CAWater-info, s.f.). El avance en la cooperación fue posible gracias a un acuerdo entre Kirguistán y Uzbekistán en 2021, en cuyo marco los países acordaron el suministro de agua a cambio de electricidad (Climate Diplomacy, 2022).

Los ecosistemas de montaña desempeñan un papel fundamental en la regulación del flujo y el suministro de agua. Por ejemplo, las zonas con vegetación, como los bosques, retienen el agua y la liberan lentamente en forma de aguas superficiales y subterráneas. La deforestación puede provocar una grave erosión del suelo, al tiempo que se pierde la función reguladora del agua del bosque y puede aumentar el riesgo de inundaciones (Stecher et al., 2023). Los ecosistemas de las montañas de Asia Central se ven afectados por la contaminación, la fragmentación y degradación del hábitat y el cambio climático. Los retos supranacionales y multidimensionales a los que se enfrenta la conservación de los hábitats hacen que sea más difícil para los distintos países regular y aplicar políticas eficaces (Van der Graaf y Siarova, 2021; Zoï Environment Network, 2022). Para preservar los frágiles ecosistemas de las zonas montañosas de la región de Asia Central, en 1994 se creó la Comisión Interestatal para el Desarrollo Sostenible de los Países de Asia Central. El objetivo de la comisión es ampliar la cooperación regional en materia de conservación y uso sostenible de las zonas montañosas de Asia Central, en particular reforzando el marco institucional para dicha cooperación en los ecosistemas de montaña (Mosello et al., 2023).

Figura 7.3 Cordilleras de Tian Shan y Pamir en Asia Central



Nota: m s.n.m.: metros sobre el nivel del mar.

Fuente: Umirbekov et al. (2022, fig. 1, p. 4).

El cambio climático en Asia Central está provocando un aumento de las temperaturas medias, lo que conduce a un deshielo generalizado de los glaciares de la región. La precipitación media anual está aumentando, pero también la variabilidad interanual de las precipitaciones y la escorrentía correspondiente, lo que puede provocar inundaciones en invierno y sequías hidrológicas en verano. El aumento de la variabilidad ha ejercido presión sobre el funcionamiento de las centrales hidroeléctricas, el suministro de agua potable y la producción agrícola (PNUD/ENVSEC, 2011; Sorg et al., 2012). La insuficiencia de conocimientos y datos sobre los recursos naturales, la escasa cooperación institucional, la fragmentación de responsabilidades y la falta de recursos retrasan la adopción de medidas eficaces (GIZ, 2023).

Para preservar los glaciares se han propuesto soluciones técnicas, como cubrir el hielo con mantas aislantes (cuadro 7.2), como se ha probado en los Alpes, o producir nieve artificial para proteger el glaciar y amortiguar la escorrentía (Travers, 2023). Sin embargo, estas soluciones suelen considerarse demasiado costosas para aplicarlas a gran escala, aunque pueden proporcionar un alivio temporal a nivel local (Ruggeri, 2023). Mientras tanto, es necesario mejorar e intercambiar conocimientos e información, reforzar la cooperación regional, fortalecer las capacidades nacionales sobre la criosfera y la gestión de las aguas de montaña, y sensibilizar e involucrar a las principales partes interesadas en la elaboración y aplicación de planes de acción (GIZ, 2021; UNESCO, 2022).



Los países de montaña reconocen que muchos de los problemas solo pueden abordarse eficazmente colaborando con sus vecinos

El Centro Regional de Glaciología en Asia Central (CARGC) se creó en 2017 para investigar los efectos del cambio climático en los glaciares, la nieve y los recursos hídricos, y para reforzar la coordinación de las actividades de investigación y el intercambio de información en la región montañosa de Asia Central (UNESCO, s.f.). La Comisión de la República de Kazajstán y la República Kirguisa sobre el uso de las instalaciones de gestión del agua de carácter intergubernamental en los ríos Chu y Talas analiza el tema de los glaciares en el marco de su Grupo de Trabajo sobre Adaptación al Cambio Climático y Programas de Acción a Largo Plazo. Asimismo, el Fondo Internacional para Salvar el Mar de Aral (IFAS) considera los glaciares como parte de los recursos hídricos de la cuenca del Mar de Aral (Comité Ejecutivo del IFAS, 2024).

7.2.4 Conclusiones

Las cadenas montañosas de esta región albergan importantes ecosistemas. Tienen un significado cultural y son importantes fuentes de agua para las zonas circundantes. Sin embargo, están amenazadas por las tendencias demográficas, la demanda energética y agrícola, el turismo y el cambio climático, que afectan a los recursos hídricos de las montañas y a la disponibilidad de agua. Se están desarrollando estrategias y planes para mitigar estos problemas a nivel nacional, pero sigue siendo necesario un enfoque más integrado, como vincular la gestión del uso del suelo con la gestión del agua y crear incentivos para la protección de los ecosistemas de montaña. Los países de montaña reconocen que muchos de los problemas solo pueden abordarse eficazmente colaborando con sus vecinos.

El Convenio de los Cárpatos y el Convenio de los Alpes, así como la Comisión Intergubernamental sobre Asia Central, reflejan esta necesidad de cooperación. Además, organizaciones de cuencas transfronterizas como la Comisión del Dniéster, la Comisión del Chu-Talas, la Comisión Internacional para la Protección del Río Danubio, la Comisión Internacional para la Protección del Rin y el Fondo Internacional para Salvar el Mar de Aral prestan una atención considerable a las montañas y los glaciares en el proceso general de gestión de cuencas fluviales, así como en áreas temáticas específicas de cooperación como la adaptación, la conservación, la gestión de inundaciones y el seguimiento. Los debates en estas organizaciones transfronterizas, donde también se intercambian conocimientos y experiencias, contribuyen a estimular las actividades a nivel nacional.

7.3 América Latina y el Caribe

Las torres de agua de América Latina y el Caribe ocupan aproximadamente un tercio del territorio regional (FAO, 2000), y producen más caudal de agua por superficie terrestre que cualquier otro continente (Bretas et al., 2020). Las montañas de la región incluyen la Sierra Madre en México, la cordillera centroamericana, las Sierras y Tierras Altas del Caribe, las Tierras Altas del Brasil y los Andes (figura 7.4; FAO, 2000). La Cordillera de los Andes (la cadena montañosa más larga del mundo, con más de 7 000 km de extensión) alimenta la mayoría de los cursos de agua de la región (FAO, 2000), y aporta un 50 % del caudal del río Amazonas (Bretas et al., 2020).

En 2017 aproximadamente el 25 % de la población de América Latina y el Caribe (167 millones de personas) vivía en las montañas; de estas personas, 112 millones residían en zonas urbanas. Unos 17 millones de personas vivían en zonas de montaña a menudo vulnerables a una intensa variabilidad climática y a la degradación del suelo (Romeo et al., 2020).

Figura 7.4
Principales cadenas montañosas y ríos de América Latina y el Caribe

Nota: los verdes más oscuros representan elevaciones superiores a 1 000 m s. n. m..



Fuente: autores.

● ● ●
Los glaciares de toda la región están experimentando una importante reducción general de su volumen

Los glaciares de toda la región están experimentando una importante reducción general de su volumen (OMM, 2023). Varios han desaparecido por completo, como el glaciar Ventorrillo en México, el glaciar Chacaltaya en el Estado Plurinacional de Bolivia (WGMS, 2024) y el glaciar Humboldt en la República Bolivariana de Venezuela (Reyes Haczek, 2022). Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), el calentamiento global ha causado una pérdida de entre el 30 % y el 50 % de la superficie de los glaciares de los Andes desde la década de 1980, lo que supone uno de los descensos más significativos a nivel mundial (IPCC, 2022). En el extremo sur de los Andes, la pérdida de masa glaciar se ha estimado en alrededor de 22,9 Gt por año (Dussailant et al., 2019).

Desde mediados del siglo XIX, Colombia ha perdido el 90 % de sus glaciares. Se trata de una tendencia preocupante ejemplificada por la rápida desaparición del glaciar de la Sierra Nevada de Santa Marta, que es uno de los pocos glaciares situados cerca del mar Caribe (<50 km). Es fuente de más de 30 ríos, sitio irremplazable para la biodiversidad y sagrado para las cuatro comunidades indígenas asentadas en la zona, compuestas por más de 3 000 personas

• • •
**El agua
procedente de
las montañas es
esencial para la
producción de
cultivos agrícolas
de alto valor como
el café y el cacao**

(IDEAM, 2021). A medida que el volumen del glaciar disminuye, los caudales que abastecen de agua potable y alimentos a las poblaciones se ven afectados, obligando a las personas a desplazarse y dejar atrás su entorno, sus creencias y el legado de sus antepasados. La situación también se ha visto agravada por los conflictos sociales por el uso de la tierra, en los que grupos armados controlan el territorio ilegalmente, por lo que las comunidades indígenas no tienen más remedio que huir (Cajar, 2024).

El cambio climático y las actividades humanas han acelerado la deforestación en los Andes, que albergan ecosistemas cruciales para la captación de agua dulce. Por ejemplo, los bosques nativos altoandinos se han reducido a solo un 3-10 % de su extensión original, poniendo a las comunidades indígenas en riesgo de una grave inseguridad hídrica (FAO/PNUMA, 2023). Otras zonas montañosas de la región se enfrentan a procesos de degradación similares.

7.3.1 Retos e intervenciones para la gestión del agua

Alimentación y agricultura

El agua procedente de las montañas es esencial para la producción de cultivos agrícolas de alto valor como el café y el cacao en países como el Brasil, Colombia, el Ecuador, Guatemala, México, el Perú y la República Bolivariana de Venezuela.

En la región andina, el agua también es crucial para el cultivo de alimentos básicos como la patata, el maíz y la quinoa (Wymann von Dach et al., 2014). La agricultura andina genera entre el 3 % y el 13 % del producto interior bruto nacional y entre el 7 % y el 34 % del empleo en la región (CEPAL, 2024). Se calcula que las exportaciones de alimentos representan entre el 18 % y el 54 % de las exportaciones totales (Olmos, 2017). Entre el 15 % y el 17 % del total de las tierras de cultivo de los países andinos se encuentra en la Cordillera de los Andes, concentrándose la mayor proporción de tierras de cultivo de montaña en el norte, en Colombia, el Ecuador y el Perú (Devenish y Gianella, 2012; Schoolmeester et al., 2018). El cambio de las condiciones hidrológicas en los Andes bolivianos ha reducido la superficie en la que pueden pastar las llamas, obligando a algunos agricultores a dedicarse a la piscicultura (PNUMA, 2023b). Un impacto asociado a la reducción de los glaciares andinos, junto con el aumento de la temperatura, la reducción de las horas de frío y la disminución de la disponibilidad de agua, es el efecto sobre la producción de cultivos de invierno, frutales, viñedos y algunas especies forestales en Chile y la región centro occidental de la Argentina (Magrin et al., 2014).

En La Paz, Estado Plurinacional de Bolivia, la comunidad de Cebollullo depende del agua del glaciar Illimani para el riego. Sin embargo, el cambio climático ha acelerado el deshielo del glaciar, reduciendo así la disponibilidad de agua y alterando las prácticas agrícolas. Para hacer frente a esta situación, los agricultores han reintroducido un antiguo sistema de riego que utiliza surcos en zigzag, lo que ralentiza el flujo del agua y reduce la erosión del suelo (BID, 2020).

La comunidad Phinaya del Perú depende de la fibra y la carne de alpaca y vicuña. Se enfrenta a problemas debidos al aumento de las temperaturas por encima de los 4 000 m s.n.m., que provoca la desecación de los humedales, escasez de agua y enfermedades. Un proyecto piloto construyó presas en pequeñas lagunas periglaciares, mejorando la disponibilidad de agua para los camélidos y restaurando los humedales y los pastos. Esto ha potenciado la cría de camélidos y mejorado la cantidad y calidad de la fibra de alpaca (Canales Sierra, 2018). El deshielo de los glaciares en la Cordillera Blanca del Perú ha provocado que siete de



Las ciudades que dependen del agua de deshielo de los glaciares para su abastecimiento de agua para uso doméstico han experimentado reducciones sustanciales en la disponibilidad de esta fuente

las nueve cuencas hayan cruzado un umbral crítico debido a la reducción del caudal de agua superficial y la descarga fluvial durante la estación seca, superando los límites de adaptación¹⁷ (Samaniego et al., 2017).

En el corredor seco de Guatemala, que atraviesa la cordillera centroamericana, los agricultores luchan contra la variabilidad climática, los períodos de sequía y fenómenos meteorológicos extremos cada vez más frecuentes, que alteran los calendarios tradicionales de siembra. Para hacer frente a estos retos, se ha puesto en marcha un programa en los departamentos de Chiquimula, El Progreso y Zacapa, que involucra a 6 000 familias agricultoras de 60 comunidades. Estas zonas se ven especialmente afectadas por condiciones climáticas adversas, problemas socioeconómicos y un acceso limitado a los recursos. El programa de Servicios Climáticos Integrados Participativos para la Agricultura mejora el acceso a información fiable sobre el clima, lo que permite a las comunidades tomar decisiones informadas sobre sus actividades agrícolas. Más de 5 000 líderes comunitarios han sido capacitados mediante talleres de formación para aplicar estos conocimientos (Valdivia Araica et al., 2023).

Asentamientos humanos

Las ciudades que dependen del agua de deshielo de los glaciares para su abastecimiento de agua para uso doméstico han experimentado reducciones sustanciales en la disponibilidad de esta fuente (IPCC, 2022). Por ejemplo, entre 1970 y 2010 la superficie de los glaciares que abastecen de agua a Lima disminuyó un 43 % debido a que el aumento de las temperaturas provocó su deshielo. En consecuencia, en 2010, la disponibilidad potencial de agua de la ciudad se había reducido a 125 m³ por habitante al año, una de las más bajas de la región¹⁸ (González Molina y Vacher, 2014). Si se mantiene la tendencia al aumento de las temperaturas, puede producirse una aceleración del deshielo, así como un aumento de la escorrentía en las subcuencas (véase el cuadro 2.2). Más adelante, cuando el depósito glaciar se reduzca, las aportaciones de agua de deshielo serán menores (González Molina y Vacher, 2014).

Del mismo modo, Santiago, que depende parcialmente del agua procedente del deshielo, se ha enfrentado a un riesgo significativo debido a una megasequía. Con un déficit de precipitaciones del 20-40 %, se ha producido una notable reducción de la acumulación de nieve, así como una disminución de los volúmenes de los embalses y de los niveles de las aguas subterráneas (Garreaud et al., 2019). Esto pone en peligro el suministro de agua de Santiago, especialmente durante el verano, cuando hasta el 70 % del agua de la ciudad proviene de los glaciares (Aguas Andinas, 2024).

En Bogotá, aproximadamente el 80 % del agua potable de la ciudad proviene del páramo de Chingaza, mientras que el páramo de Sumapaz y el complejo de páramos de Guerrero aportan el 5 % y 15 % respectivamente (Canal Capital, 2023). Cabe destacar que el sistema Chingaza ha experimentado una reducción significativa de sus niveles de agua, que han disminuido en un 85 % debido al fenómeno de El Niño, una prolongada estación seca y altas temperaturas, lo que ha provocado un racionamiento de agua en la ciudad de 8 millones de habitantes en abril de 2024 (Ownby, 2024).

¹⁷ Umbrales en los que los objetivos de un individuo o sistema ya no pueden protegerse mediante acciones adaptativas porque se ha superado la capacidad de adaptación de los organismos y las comunidades (Klein et al., 2014). La adaptación transformadora ofrece opciones y estrategias que pueden utilizarse para reorganizar los sistemas cuando alcanzan sus límites, como la reubicación de la producción en zonas más frescas o la diversificación hacia otros cultivos (Samaniego et al., 2017).

¹⁸ En 2021, el total anual de recursos hídricos renovables per cápita en los países andinos era de 41 090 m³ (FAO, s.f.).

• • •
La mayoría de los países de los Andes tropicales dependen del agua de deshielo del hielo y la nieve para satisfacer su demanda de producción de electricidad

Para abordar problemas similares en el Ecuador, las comunidades de la Sierra Central participaron en un programa de pago por servicios ecosistémicos, recibiendo incentivos económicos directos (30 dólares por hectárea y año) apoyados por el Gobierno central a través del programa Socio Páramo (Torres et al., 2023). Lideradas por las jóvenes generaciones, estas comunidades aplicaron estrategias basadas en la tecnología social, promoviendo la participación comunitaria y los conocimientos locales para proteger y restaurar el páramo. Las estrategias incluían la designación de zonas protegidas para la recarga de agua, la reducción del pastoreo y la restauración de la vegetación autóctona, combinadas con incentivos económicos y oportunidades de desarrollo. Los resultados mostraron una ralentización del ritmo de pérdida del páramo hasta el 3,3% entre el segundo periodo (2000-2008) y el tercero (2013-2021), basándose en imágenes de satélite. Aunque la participación gubernamental ha sido significativa, la eficacia de la protección de los páramos ha sido mayor en las zonas donde las decisiones se tomaron a nivel local, lo que pone de relieve la importancia de la participación comunitaria en la gestión sostenible de los recursos hídricos y la resiliencia al cambio climático (Torres et al., 2023).

En Intag (Ecuador), un proyecto de conservación del agua y los bosques ha beneficiado a 38 comunidades y ha llegado a unas 7 000 personas. La iniciativa ha creado reservas de cuencas hidrográficas gestionadas por la comunidad, adquiridas por una organización no gubernamental local y gestionadas de forma sostenible por grupos locales. Este planteamiento ha mejorado la calidad del agua, ha evitado inundaciones y corrimientos de tierras y ha fomentado el ecoturismo, reduciendo al mismo tiempo la emigración. Al implicar a las comunidades en la gestión de estas reservas, el proyecto ha mejorado la concientización con respecto a los esfuerzos de conservación necesarios y ha fomentado el empoderamiento local (PNUD, 2019; FAO/PNUMA, 2023).

Industria y energía

Además de ser una fuente vital de agua, las montañas también generan energía sostenible para ciudades y comunidades más pequeñas río abajo, así como para aldeas remotas en zonas montañosas. En América Latina, el 85 % de la energía hidroeléctrica provino de fuentes montañosas en 2013 (Alianza para las Montañas, 2013).

La mayoría de los países de los Andes tropicales dependen del agua de deshielo del hielo y la nieve para satisfacer su demanda de producción de electricidad. Por ejemplo, alrededor del 92 % de la generación de energía en el Ecuador proviene de centrales hidroeléctricas (Ministerio de Energía y Minas del Ecuador, s.f.). Una estimación sobre el Cañón del Pato (una de las centrales hidroeléctricas más grandes del Perú) proyectó que la desaparición total de los glaciares podría resultar en una reducción del 15 % en la producción de electricidad de la central (UNESCO/UICN, 2022).

La reducción de las precipitaciones también afecta la producción hidroeléctrica. En la mayoría de los escenarios, se prevé que la Argentina y Chile experimenten reducciones notables en su generación de energía hidroeléctrica entre 2020 y 2100, (AIE, 2021). Esto se debe principalmente a menores niveles de precipitación promedio (debido al cambio climático) en los Andes centrales y la Patagonia, y a la consiguiente reducción del caudal en las principales cuencas hidrográficas.

Se han producido conflictos sociales relacionados con el agua en zonas de alta montaña de los países andinos, muchos de los cuales pueden atribuirse parcialmente a la actividad minera. Además de la extracción de agua, la minería altera las cuencas en cierta medida, tanto superficiales (por ejemplo, remoción de suelo o cubierta vegetal, alteración o represamiento de ríos, derribo de glaciares y modificación de la topografía) como subsuperficiales, lo que afecta negativamente la disponibilidad de agua para los usuarios aguas abajo (Altomonte y Sánchez, 2016). En Chile, en la cordillera entre Copiapó y Rancagua, para 2010 los proyectos mineros habían afectado 4,5 km² de glaciares de

• • •

Las zonas montañosas de América Latina y el Caribe se ven cada vez más afectadas por el cambio climático y las actividades humanas

roca, lo que resultó en una pérdida estimada de alrededor de 24 106 m³ de agua dulce (Bodin, 2019). A modo de comparación, el glaciar Juncal Norte (7,6 km²), ubicado cerca de Santiago, perdió 1,5 km² de su superficie entre 1955 y 2006 (Bown et al., 2008).

Protección ambiental

La Argentina cuenta con una ley específica y ratificada dedicada a la protección de los glaciares. Promulgada en octubre de 2010 como Ley 26.639, titulada *Régimen de Presupuestos Mínimos para la Preservación de los Glaciares y del Ambiente Periglacial*, su principal objetivo es salvaguardar los glaciares como reservas hídricas estratégicas y puntos críticos de biodiversidad, reconociendo su valor como “repositorios científicos” y atractivos turísticos. Esta legislación impuso prohibiciones estrictas, también con respecto a la liberación de contaminantes tóxicos, las actividades de construcción, la minería, la exploración de hidrocarburos y las instalaciones industriales (Gobierno de Argentina, 2010). Chile está desarrollando iniciativas para promulgar una ley sobre protección de glaciares. En 2022 se presentó un proyecto de ley, aprobado por la Comisión de Medio Ambiente del Senado, con disposiciones explícitas para la protección del permafrost (Comisión de Medio Ambiente y Bienes Nacionales, 2022).

Ciertos glaciares y zonas nevadas reciben protección indirecta al estar incluidos en espacios designados, como parques nacionales u otras áreas protegidas. Por ejemplo, en territorio colombiano, seis glaciares han sido protegidos desde 1959 bajo la categoría de Parques Nacionales Naturales, de conformidad con los mandatos de la Constitución Política de 1991, que los designó como bienes de uso público por su carácter inalienable, imprescriptible e inembargable; esto significa que no pueden ser transferidos, perder vigencia o ser confiscados (García Pachón, 2018). De igual manera, en el Ecuador las zonas de gran altitud con nevadas perpetuas se encuentran dentro de diversas áreas protegidas. Una parte considerable del territorio chileno está integrada en el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado, que incorpora numerosos glaciares a las áreas designadas (Ministerio de Bienes Nacionales de Chile, 2023).

Ante los cambios en la masa de agua en las zonas montañosas, numerosos países de la región impulsan iniciativas de investigación y monitoreo para abordar este acuciante problema (véase el capítulo 8). Por ejemplo, el Estado Plurinacional de Bolivia ha estado monitoreando activamente los glaciares en las cuencas de las ciudades de El Alto y La Paz desde octubre de 2023 (Ministerio de Relaciones Exteriores del Estado Plurinacional de Bolivia, 2023). Chile cuenta con una red de estaciones glaciológicas que comprende al menos 80 puntos de monitoreo, lo que facilita la evaluación integral de la dinámica de los glaciares (Ministerio de Obras Públicas de Chile, 2023).

7.3.2 Conclusiones

Las zonas montañosas de América Latina y el Caribe se ven cada vez más afectadas por el cambio climático y las actividades humanas. Estas perturbaciones afectan el ciclo hidrológico, lo que pone en peligro el sustento de las comunidades que dependen de la agricultura. Además, estas perturbaciones tienen consecuencias de gran alcance en las zonas bajas y los centros urbanos que dependen de las fuentes de agua de las montañas para el suministro de agua potable y energía.

En respuesta, varios países de la región han promulgado políticas y leyes para proteger estos ecosistemas esenciales. Algunos sistemas ya han superado umbrales críticos, lo que hace crucial promover medidas de adaptación como: a) implementar soluciones

7.4 Asia y el Pacífico

• • •
La región de Asia y el Pacífico alberga algunas de las montañas más altas del mundo y algunos de los sistemas glaciares más extensos

basadas en la naturaleza (SBN), incluida la reforestación; b) adoptar prácticas tradicionales, como la captación de agua y las técnicas de siembra, ampliamente empleadas por las comunidades indígenas de la región; c) implementar estrategias de adaptación transformadoras para satisfacer la demanda de agua para los cultivos y asegurar los medios de vida; d) ampliar las infraestructuras de captación de agua.

Para implementar estas medidas de manera efectiva, se necesitan fondos bien focalizados, un seguimiento sólido, desarrollo de capacidades y marcos de gobernanza inclusivos que fomenten el diálogo y la inclusión de las comunidades locales para aplicar las mejores prácticas disponibles adaptadas a los contextos locales en las regiones montañosas.

La región de Asia y el Pacífico alberga algunas de las montañas más altas del mundo y algunos de los sistemas glaciares más extensos. La Meseta del Tíbet y las cordilleras circundantes del Pamir y del Hindu Kush Himalaya (HKH), así como las montañas Hengduan, Tien Shan y Qilian, abarcan 5 millones de km² de altas montañas, con 100 000 km² de glaciares. El que se conoce como Tercer Polo, también denominado torre de agua de Asia, almacena más hielo y nieve que cualquier otra región fuera de la Antártida y el Ártico (PNUMA, 2022b). En el Tercer Polo nacen más de diez sistemas fluviales que son de vital importancia para el sustento de casi 2 000 millones de personas en las cuencas hidrográficas de Asia Central, Nororiental, Meridional y Sudoriental (ICIMOD, 2023). Si bien se prevé que se caliente más rápido que el promedio mundial (PNUMA, 2022b), el Tercer Polo es una de las zonas con mayor diversidad biológica y fragilidad ecológica del mundo, y alberga una gran variedad de culturas.

7.4.1 Tendencias e impactos

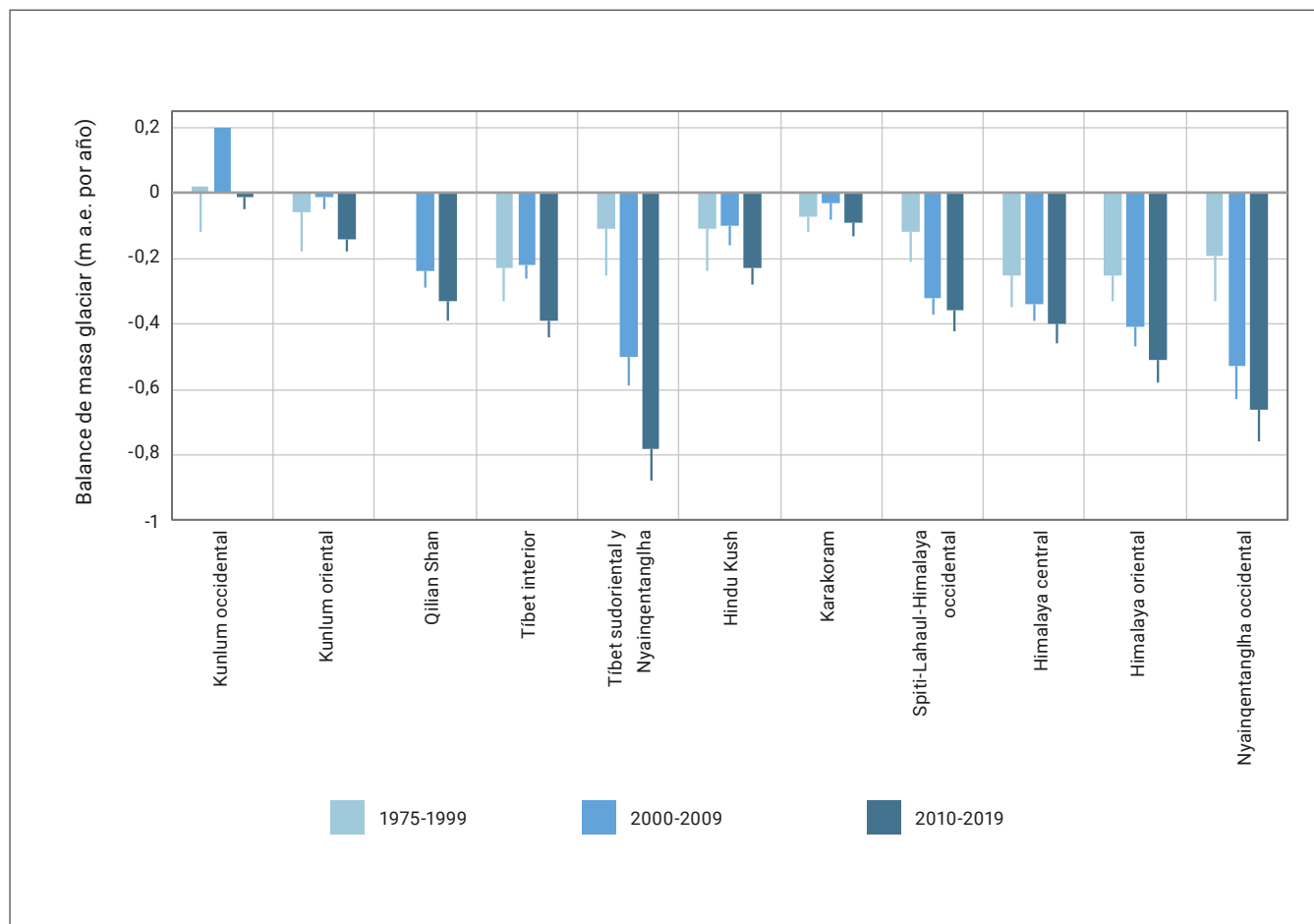
Las montañas y los glaciares de la región de Asia y el Pacífico se encuentran entre los más vulnerables a los continuos cambios climáticos, sociales y ambientales (Immerzeel et al., 2020). Los glaciares de la región del HKH están desapareciendo a un ritmo alarmante: un 65 % más rápido entre 2011 y 2020 que en la década anterior (ICIMOD, 2023). También se están derritiendo a un ritmo superior al promedio mundial (Mani, 2021), y las pérdidas más significativas se concentran en la región oriental del HKH (figura 7.5).

Se ha calculado que, en escenarios de calentamiento global de entre 1,5 °C y 2 °C, el volumen de los glaciares en la región del HKH podría reducirse entre un 30 % y un 50 % para 2100. Si el calentamiento global supera los 2° C, estos glaciares podrían reducirse hasta un 20-45 % del volumen que tenían en 2020 (ICIMOD, 2023).

Estas tendencias de calentamiento y deshielo provocarán cambios importantes. Se han proyectado aumentos en la escorrentía total en la región del Tercer Polo, con los mayores impactos en las cuencas fluviales dominadas por el monzón. Respecto a ríos como el Indo, donde la contribución del deshielo de los glaciares y la nieve es alta, se espera que el aumento del caudal alcance su punto máximo (véase el cuadro 2.2) y luego disminuya (Wester et al., 2019; PNUMA 2022b).

Si bien los impactos varían según la cuenca hidrográfica, la investigación reitera el papel del derretimiento de los glaciares como contribuyente a los desbordamientos repentinos de lagos glaciares (ver sección 2.2.3), inundaciones inesperadas y deslizamientos de tierra (Adler et al., 2022) y daños elevados a los asentamientos humanos, la producción agrícola y de pasturas, las redes de transporte y los sistemas de energía hidroeléctrica. Se estima que en los últimos 190 años la creciente frecuencia de los desbordamientos

Figura 7.5 Balances de masa de los glaciares en toda la región, expresados en metros de agua equivalente (m a.e.) por año de diferentes áreas de la región del Hindu Kush Himalaya durante los períodos 1975-1999, 2000-2009 y 2010-2019



Nota: un valor de -1,0 m a.e. por año representa una pérdida de masa de 1 000 kg/m² de capa de hielo o una pérdida anual del espesor del hielo en todo el glaciar de aproximadamente 1,1 m por año, ya que la densidad del hielo es solo 0,9 veces la densidad del agua.

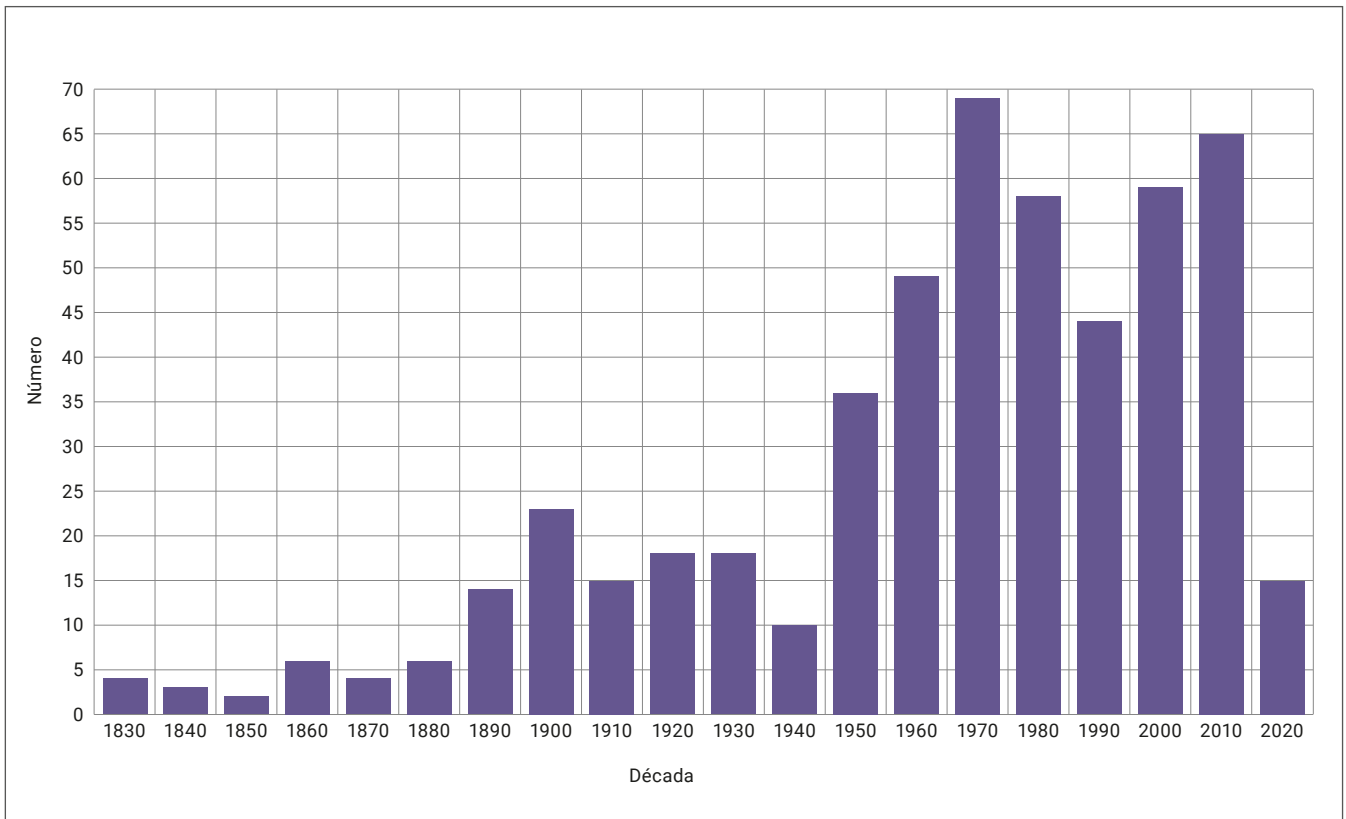
Fuente: CESPAP/PNUMA/OIT/Centro de Colaboración Regional de Asia y el Pacífico de la CMNUCC/ONUDI (2023, fig. 20, p. 74), basado en datos de Jackson et al. (2023).

repentinos de lagos glaciares derivados de la rápida formación y expansión de lagos glaciares (figura 7.6) ha causado más de 7 000 muertes (Shrestha, 2023). Se prevé que el riesgo de que se produzcan desbordamientos repentinos de lagos glaciares en la región del HKH se triplique para finales de siglo, y que un número significativo de desbordamientos de este tipo afecte a otros países río abajo, principalmente en la parte oriental del Himalaya (Zheng et al., 2021). Muchas de las consecuencias superarán los límites de las medidas de adaptación.

A largo plazo, se prevé que la reducción de los caudales hídricos y el aumento de las sequías pongan en peligro la seguridad alimentaria, hídrica, energética y de los medios de vida en la región del HKH (Mani, 2021), además de perturbar los ecosistemas y aumentar los riesgos de conflicto y migración (Caretta et al., 2022). Las poblaciones más vulnerables y marginadas suelen ser las que corren mayor riesgo, como los agricultores de montaña y las comunidades indígenas.

El uso de energía, la degradación ambiental y la actividad humana contribuyen a generar riesgos de otro tipo: el carbono negro (véase el cuadro 2.1), los metales pesados y los contaminantes orgánicos persistentes muestran una presencia

Figura 7.6 Número de desbordamientos repentinos de lagos glaciares registrados por década en las altas montañas de Asia, de la década de 1830 a la de 2020



Fuente: adaptado de Shrestha (2023).

● ● ●
Se ha descubierto que la deposición de carbono negro acelera el ritmo del derretimiento de los glaciares

cada vez mayor en el Tercer Polo (PNUMA, 2022b). Se ha descubierto que la deposición de carbono negro (procedente de la combustión incompleta de combustibles fósiles y la combustión de biomasa, incluidos los incendios forestales) acelera el ritmo del derretimiento de los glaciares en diferentes grados dependiendo de la ubicación del depósito, ya sea en nieve fresca o en hielo; sin embargo, este fenómeno puede ser impulsado también por otros factores (Kang et al., 2020). Un estudio estimó la pérdida de masa glaciaria en la Meseta del Tíbet a lo largo de 40 años en aproximadamente 450 km³, de los cuales entre 20 y 80 km³ se atribuyeron a los efectos del carbono negro y otros depósitos que absorben la luz (Zhang et al., 2018). Con la desecación del Mar de Aral y sus alrededores, el desierto de Aralkum se considera ahora una de las fuentes de polvo más dañinas del mundo. Este desierto, perturbado por la acción humana, es una fuente de contaminantes como metales pesados y pesticidas que viajan largas distancias, acelerando el derretimiento de los glaciares y contaminando los sistemas de agua dulce (Zhang et al., 2020; Banks et al., 2022; Chen et al., 2022).

Además de la región del Tercer Polo, el derretimiento de los glaciares y las amenazas a los ecosistemas montañosos también son una preocupación clave en el Pacífico. Por ejemplo, se ha observado un retroceso de los glaciares en los Alpes del Sur de Nueva Zelanda, y se calcula que para 2100 el país perderá el 88 % del volumen de hielo que tenía en 2011. La invasión de especies no autóctonas, el cambio climático y las actividades humanas plantean desafíos importantes a los ecosistemas montañosos de los pequeños estados insulares en desarrollo del Pacífico, lo que provoca cambios en el rendimiento hídrico, el riesgo de incendios y amenazas a la biodiversidad (Frazier y Brewington, 2020).

• • •
La cooperación regional en el monitoreo de glaciares ha sido fundamental para detectar tendencias críticas

Las tendencias y los impactos señalados anteriormente subrayan la importancia de colaborar en las estrategias de adaptación y las medidas para mitigar las consecuencias, especialmente en el contexto de las regiones vulnerables.

7.4.2 Cooperación regional y transfronteriza

La cooperación regional en el monitoreo de glaciares ha sido fundamental para detectar tendencias críticas. Se han adoptado varias medidas importantes, como se describe a continuación, para fortalecer los acuerdos institucionales de cooperación entre cuencas hidrográficas compartidas, con especial atención a la cooperación científica y los sistemas de alerta temprana (SAT). Estos proporcionan modelos para las regiones montañosas con cuencas hidrográficas compartidas que buscan abordar los impactos del cambio climático y el deshielo de los glaciares, dentro y fuera de la región de Asia y el Pacífico.

Cooperación científica internacional en el Tercer Polo para fortalecer los sistemas de alerta temprana y el análisis de impacto

El establecimiento de la Red de Centros Regionales sobre el Clima del Tercer Polo (TPRCC-Network) de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) es un avance clave para satisfacer las necesidades específicas de la región en materia de servicios relacionados con el clima y la criosfera. Los tres nodos de la TPRCC-Network incluyen un nodo septentrional (liderado por China), un nodo meridional (liderado por la India) y un nodo occidental (liderado por el Pakistán), siendo China la principal responsable de la coordinación (OMM, 2024b). La Comisión Económica y Social para Asia y el Pacífico, junto con el Centro Internacional para la Ordenación Integrada de las Montañas, el programa Third Pole Environment, la Vigilancia de la Criosfera Global de la OMM, el programa Global Energy and Water Exchanges y la Iniciativa para el Estudio de las Montañas (MRI), son socios contribuyentes de la TPRCC-Network. La fase de demostración se inició en junio de 2024 en Lijiang (China). Se espera que la red promueva los sistemas de alerta temprana y el análisis de impacto. Emite declaraciones periódicas de consenso que integran datos de observación, tendencias históricas y pronósticos que proporcionan una visión general de la temperatura del aire, la precipitación, la cobertura de nieve, los eventos extremos y los riesgos observados durante la temporada anterior, y ofrecen una perspectiva para la temporada siguiente.

Investigación conjunta y alerta temprana a través de una red de observatorios de montaña de Asia Central

El Centro Glaciológico Regional de Asia Central (CARGC) se creó como centro de categoría 2 bajo los auspicios de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura en Kazajistán tras la ratificación de un acuerdo por parte del país en 2017. Proporciona una plataforma para la cooperación científica y técnica a nivel transfronterizo en materia de vigilancia de glaciares en Asia Central (UNESCO, 2024; s.f.). En 2023, el centro firmó un memorando de entendimiento con representantes de instituciones nacionales de Asia Central y otras instituciones de vigilancia hidrometeorológica para establecer una cooperación multilateral y una base para avanzar en la investigación glaciológica dentro de la red de observatorios de montaña de Asia Central. La red ha recibido apoyo para entregar los primeros conjuntos de datos abiertos relativos a las actividades de vigilancia anteriores y reforzará las capacidades de vigilancia relacionadas en la región (MRI/GEO Mountains, 2023). Hasta la fecha, las actividades de colaboración han incluido estudios conjuntos, expediciones sobre el terreno y la instalación de un sistema de alerta temprana para los desbordamientos de lagos morrénicos.

● ● ●
**Es esencial
colaborar para
implicar a las
diversas partes
interesadas y
sectores que se
verán afectados
por las tendencias**

Cooperación transfronteriza en la región del HKH

El Centro Internacional para la Ordenación Integrada de las Montañas lideró el Llamado a la Acción para el HKH, que fue respaldado mediante una declaración ministerial en 2020. Este llamado, que contó con la participación de múltiples partes interesadas a través de talleres consultivos en la fase de borrador, instaba encarecidamente a: la cooperación a todos los niveles en la región del HKH, el reconocimiento de la singularidad de los pueblos de montaña del HKH, la acción concertada por el clima, el fortalecimiento de las iniciativas en nueve prioridades relacionadas con las zonas de montaña, la mejora de la resiliencia de los ecosistemas y la detención de la pérdida de biodiversidad, el intercambio regional de datos y la cooperación científica y de conocimientos (ICIMOD, 2020). El Llamado a la Acción ha reforzado las alianzas para el desarrollo sostenible de las montañas entre los países de la región del HKH y ha apoyado la agenda de acción por las montañas en los foros mundiales (ICIMOD, s.f.). Ha recibido un nuevo impulso a través de la segunda Cumbre Ministerial (HKH Ministerial Mountain Summit) en 2024.

Acceso a datos y previsiones casi en tiempo real en la cuenca del Mekong

La cuenca del río Mekong es vulnerable a los efectos del cambio climático y el deshielo de los glaciares. Desde 2008, 49 estaciones hidrometeorológicas automáticas, establecidas en el marco del Proyecto del Sistema de Observación del Ciclo Hidrológico del Mekong en Camboya, el sur de China, la República Democrática Popular Lao, Tailandia y Viet Nam, han estado recopilando datos, incluidos el nivel del agua y las precipitaciones. Estas estaciones transmiten datos casi en tiempo real a intervalos de 15 minutos a la Secretaría de la Comisión del Río Mekong y a los organismos nacionales responsables de la reducción del riesgo de desastres y la gestión de los recursos hídricos. El estado diario de los niveles de agua, las previsiones semanales, los promedios a largo plazo, las alertas de inundaciones repentinas y las previsiones de sequía son algunos de los datos e información fácilmente disponibles en el sitio web de la Secretaría de la Comisión del Río Mekong (Comisión del Río Mekong, s.f.).

7.4.3 Caminos hacia adelante

Es esencial colaborar para implicar a las diversas partes interesadas y sectores que se verán afectados por las tendencias. El deshielo de los glaciares y las crisis relacionadas con el agua deben abordarse reforzando las medidas de adaptación, la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) y las soluciones sinérgicas para el clima, la naturaleza y la contaminación, con el apoyo de la colaboración transfronteriza, el diálogo regional, la promoción y la sensibilización.

Hacer frente a las presiones del clima, de la contaminación orgánica y atmosférica sobre los glaciares

La aplicación de medidas viables desde el punto de vista económico y técnico, como la mejora de la eficiencia de los hornos de ladrillos y los incentivos a los hogares para que cambien a combustibles más limpios, como el gas licuado de petróleo y la energía solar, pueden contribuir de forma importante a contener el deshielo de los glaciares mediante la reducción de las emisiones de carbono negro (Mani, 2021). Las medidas para mitigar las tendencias de desecación en la cuenca del Mar de Aral y reducir las tormentas de polvo son importantes, incluso a través de SBN, que también requieren más atención en el contexto de la planificación de la adaptación. Abordar las emisiones de polvo y carbono negro puede reducir las presiones sobre los glaciares al conservar sus propiedades de albedo y mejorar las condiciones ambientales.

• • •
Varias iniciativas de cooperación hacen hincapié en el empoderamiento y la participación de las comunidades locales, incluidos los pueblos indígenas, las jóvenes generaciones y los grupos vulnerables

Planificación conjunta de las estrategias de adaptación

Aunque las crisis relacionadas con el agua son posiblemente el foco más importante para la adaptación climática en las zonas de alta montaña de Asia y el Pacífico, es esencial desarrollar estrategias conjuntas de adaptación que traspasen las fronteras nacionales y administrativas. Se necesitan inversiones en infraestructuras resilientes, SBN, sistemas de alerta temprana eficaces y fiables, análisis de impacto y evaluación de riesgos reforzados y accesibles, incluso a nivel sectorial, para identificar los riesgos críticos, las áreas que requieren más investigación y las oportunidades de divulgación y compromiso con los sectores afectados. Al mismo tiempo, se necesitan redes de vigilancia medioambiental que hagan un seguimiento de los cambios en la cantidad y calidad del agua.

En medio de un creciente número de iniciativas institucionales, un marco de acción puede ayudar a garantizar la coordinación entre los socios de desarrollo y a movilizar proyectos e inversiones que respondan a las amenazas a nivel local y transfronterizo. También son fundamentales los enfoques de planificación de la adaptación a largo plazo, como el método de las vías de adaptación, y enfoques como la ABE y la diversificación económica y de los medios de subsistencia.

Estrategia de doble vía para gestionar los riesgos y fomentar la resiliencia y la autonomía de las comunidades

La gestión de los riesgos relacionados con los glaciares como los desbordamientos repentinos de lagos glaciares requiere un enfoque integrado de doble vía.

Enfoque 1: fortalecimiento de los SAT. Para poner en marcha acciones tempranas o preventivas, los sistemas de alerta temprana deben centrarse en las personas, basarse en el impacto y tener en cuenta los riesgos. Deben tener en cuenta riesgos complejos y en cascada, como los chaparrones vinculados a los desbordamientos repentinos de lagos glaciares, y adaptarse a las necesidades de sectores vitales como los de la energía, el agua, el transporte y las tecnologías de la información y la comunicación mediante la evaluación de riesgos y la previsión de impactos.

Enfoque 2: aumento de la resiliencia de las infraestructuras. Deben desarrollarse infraestructuras resilientes que puedan resistir y adaptarse a los peligros, así como infraestructuras que puedan apoyar una resiliencia social y económica más amplia. Este enfoque adquiere una gran importancia en las zonas de riesgos múltiples y debe apoyarse en un mapeo exhaustivo de los riesgos y en una evaluación integrada. Los sectores de infraestructuras esenciales deben diseñarse para gestionar riesgos interconectados, garantizando la resiliencia sistémica frente a emergencias y perturbaciones locales.

Varias iniciativas de cooperación hacen hincapié en el empoderamiento y la participación de las comunidades locales, incluidos los pueblos indígenas, las jóvenes generaciones y los grupos vulnerables, en los procesos relativos a los sistemas de alerta temprana y la adaptación a escala más amplia. La región de Asia y el Pacífico puede beneficiarse del desarrollo de sistemas comunitarios de alerta temprana de inundaciones y de innovaciones similares para reforzar la cooperación transfronteriza en cuencas fluviales compartidas (cuadro 7.3).

Disposiciones operativas para los cursos de agua transfronterizos y la GIRH

Las graves consecuencias del deshielo de los glaciares para la gestión de los recursos hídricos en las zonas situadas aguas abajo y el uso compartido de los cursos de agua transfronterizos en la región de Asia y el Pacífico requieren gran

Cuadro 7.3 Un sistema transfronterizo de alerta temprana de inundaciones basado en la comunidad

En 2017, los sistemas de alerta temprana basados en telemetría del distrito de Sitamarhi (la India) y del distrito de Mahottari (Nepal) —en cuya implementación participan comunidades locales, organizaciones asociadas y organismos gubernamentales y que cuentan con el apoyo del Centro Internacional para la Ordenación Integrada de las Montañas— habían proporcionado información oportuna sobre inundaciones a más de 19 000 hogares (casi 100 000 personas; ICIMOD, 2017). Los canales formales de información suelen tardar en difundir las alertas a las zonas remotas, que suelen ser las más vulnerables. Sin embargo, los sistemas operacionales de alerta temprana se basan en métodos más directos, como la comunicación por teléfono móvil, que garantizan un intercambio de información oportuno.

En el río Ratu, un río transfronterizo entre la India y Nepal, se implantó un sistema operacional de alerta temprana para las comunidades de sus orillas. Durante la inundación el 12 de agosto de 2017, el sistema ayudó a mejorar la preparación ante desastres por inundaciones en el pueblo de Shrikhandi, distrito de Sitamarhi, Bihar. El instrumento de alerta temprana creado por el Centro Internacional para la Ordenación Integrada de las Montañas y Yuganter (una ONG local) logró proporcionar información acerca del evento con entre siete y ocho horas de antelación, lo que permitió a las comunidades locales tomar medidas proactivas, incluido el traslado a lugares más seguros.

Fuentes: ICIMOD (2017); Singh Shrestha y Sherchan (2018).

atención. A pesar de los importantes avances en los sistemas regionales de seguimiento, intercambio de datos y previsión, las medidas básicas para poner en marcha la GIRH en las cuencas fluviales, ya sean transfronterizas o internas, van a la zaga de otras regiones del mundo.

En 2023, solo dos países asiáticos que comparten aguas transfronterizas —Camboya y Mongolia— tenían el 90 % o más de sus aguas cubiertas por acuerdos operativos, que son cada vez más importantes para gestionar los impactos de los cambiantes regímenes hidrológicos, en comparación con 23 países en Europa y Norteamérica (Naciones Unidas, s.f.). Este requisito básico de una gestión eficaz de los recursos hídricos sigue requiriendo inversión y atención en la región de Asia y el Pacífico, sobre todo allí donde el cambio climático y las tendencias de contaminación ambiental seguirán afectando a la disponibilidad y calidad del agua.

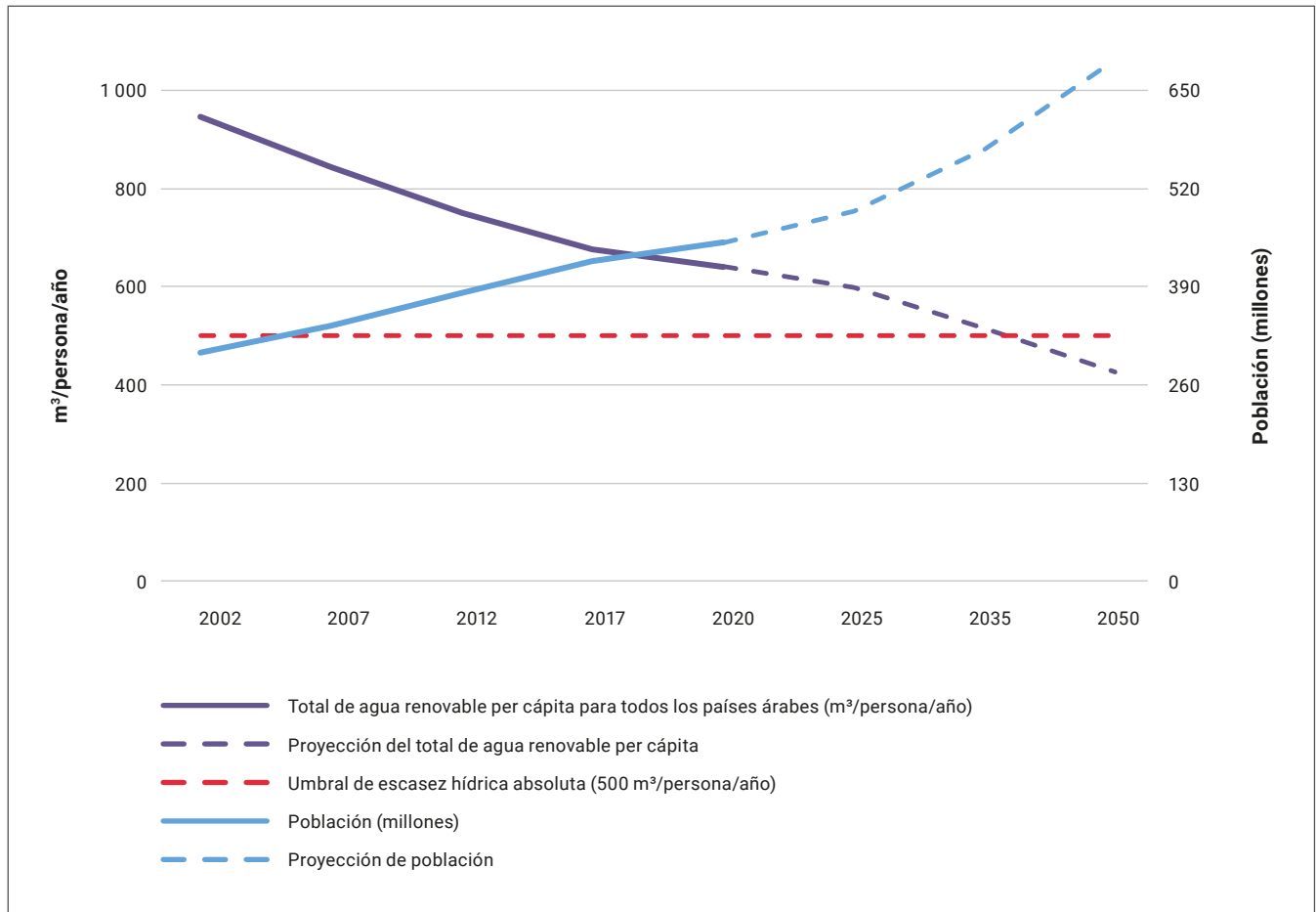
7.4.4 Conclusiones

Las actividades humanas y el cambio climático suponen una amenaza crítica para las montañas y los glaciares de la región de Asia y el Pacífico, lo que agrava los complejos retos hidrológicos a los que se enfrenta la región. Son vitales las soluciones integradas que aumenten la capacidad de adaptación y la resiliencia de la región, reduciendo al mismo tiempo las presiones sobre los glaciares y los ecosistemas acuáticos. Los esfuerzos de adaptación a nivel transfronterizo basados en los principios de cooperación y capacitación de las partes interesadas han demostrado los beneficios de la colaboración a escala regional. Sobre la base de estos avances, es necesario reforzar en la región los enfoques transfronterizos que sinergizan las políticas del sector del agua con objetivos climáticos y socioambientales más amplios.

7.5 La región árabe

A menudo las zonas montañosas de la región árabe no reciben la debida atención, a pesar del importante papel que desempeñan en el suministro de recursos hídricos y otros servicios ecosistémicos. También albergan comunidades prósperas y centros de actividad económica para el turismo, la agricultura y la industria, que a menudo dependen de la disponibilidad cada vez menor de recursos de agua dulce, lo que se traduce en una menor cantidad de agua renovable per cápita. Con el crecimiento demográfico previsto, toda la región árabe estará por debajo del umbral de escasez absoluta de agua en 2050 (figura 7.7).

Figura 7.7 Disminución pasada y futura prevista del agua renovable per cápita con el crecimiento previsto de la población en la región árabe, 2002-2050

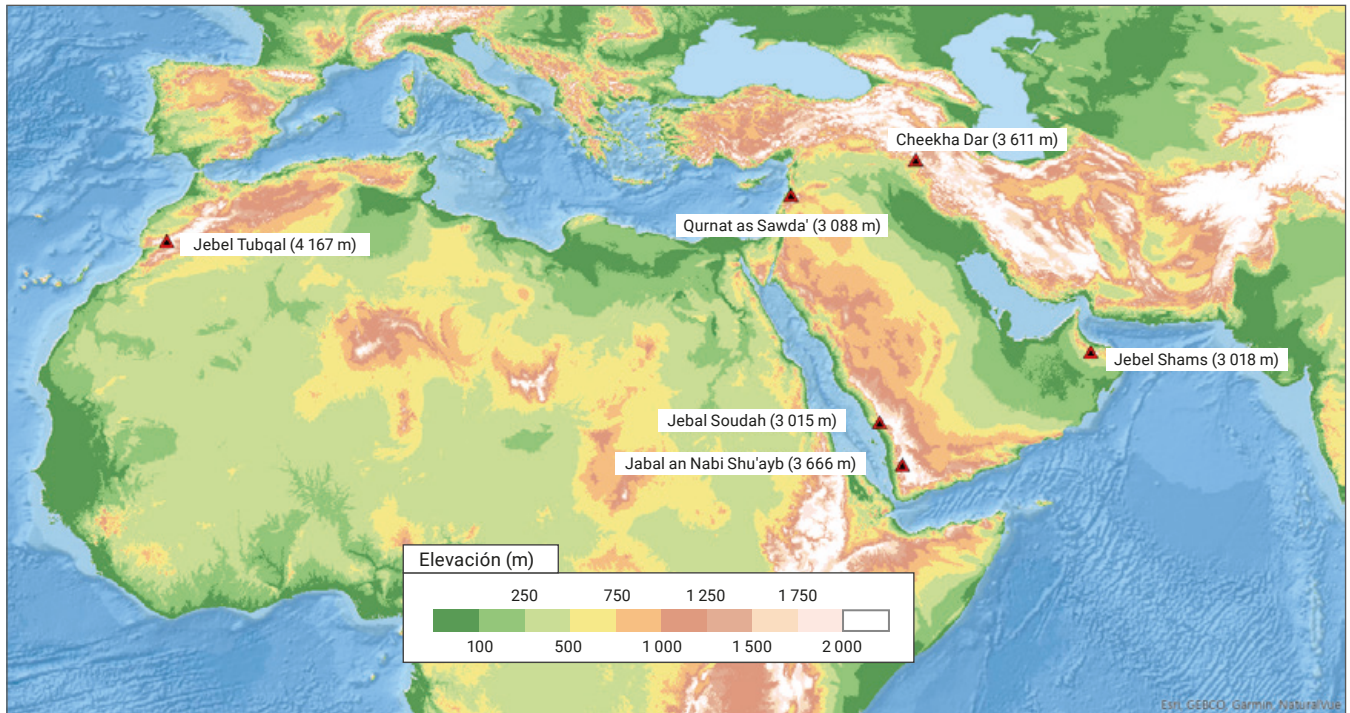


Fuente: adaptado de CESPAP (2022, fig. 9, p. 28).

Aproximadamente un tercio de la población de la región árabe vive a más de 600 m de altitud¹⁹. La nieve se acumula en varias montañas durante el invierno, como en el Monte Líbano, el Alto Atlas, los Montes Zagros y los Montes Asir (figura 7.8). Cuando las temperaturas suben en primavera, la nieve derretida alimenta arroyos, embalses y acuíferos situados a menor altitud. El agua de deshielo puede desempeñar un papel crucial para el sector agrícola, sobre todo para mantener los cultivos durante el verano, cuando las precipitaciones son limitadas. Dos de estas zonas montañosas son la Cordillera del Monte Líbano, que se extiende a lo largo de casi todo el interior del Líbano, y la Cordillera del Atlas, en el Norte de África, que se extiende por Argelia, Marruecos y Túnez, y alcanza su pico más alto en Marruecos.

¹⁹ Cálculos de los autores, basados en datos del sistema de información geográfica.

Figura 7.8 Picos y cordilleras de la región árabe



Fuente: autores.

● ● ●
A menudo las zonas montañosas de la región árabe no reciben la debida atención, a pesar del importante papel que desempeñan en el suministro de recursos hídricos y otros servicios ecosistémicos

7.5.1 Repercusiones del cambio climático en la capa de nieve

El agua de deshielo liberada por el manto nivoso es un importante recurso hídrico para las regiones costeras bajas y las llanuras interiores de la región árabe, donde se concentran población y actividades económicas. El equivalente en agua de la nieve (EAN) —el volumen de agua líquida contenida en el manto nivoso— puede proporcionar información clave para aplicar medidas adecuadas de gestión del agua (véase el sección 2.1.1). Una disminución del EAN se traduce en una disminución de los recursos hídricos disponibles que dependen de la nieve, como el agua para la recarga de las aguas subterráneas, el caudal de los manantiales y la humedad del suelo.

Algunos manantiales alimentados por acuíferos de la región árabe, como el manantial de Assal en el Líbano, se recargan principalmente mediante el agua de deshielo de la nieve (Doummar et al., 2018). Se ha estimado que la nieve aporta entre el 50 % y el 60 % del volumen de agua de los ríos y manantiales del Líbano, que alimentan los acuíferos subterráneos (Shaban, 2020). Sin embargo, la estimación del EAN basada en la profundidad y densidad aproximadas de la nieve requiere mucho tiempo (Fayad, 2019). Aunque rara vez se dispone de datos relativos al EAN en la región árabe, la duración y la profundidad de la capa de nieve pueden servir como buenos indicadores para calcular dicho parámetro (Sturm et al., 2010).

Como se prevé que las temperaturas aumenten debido al cambio climático (hasta 3,5° C y 4,5° C para 2100, según el período de referencia 1986-2005, en el Monte Líbano y las montañas del Atlas respectivamente; CESPAP et al., 2017), se espera que disminuyan las nevadas estacionales y las precipitaciones en general, lo que afectará a la duración de la capa de nieve, su profundidad y la disponibilidad general de recursos de agua dulce. Las estimaciones históricas de teledetección en el Monte Líbano informaron de que aproximadamente dos tercios de las

● ● ●
Algunos manantiales alimentados por acuíferos de la región árabe, como el manantial de Assal en el Líbano, se recargan principalmente mediante el agua de deshielo de la nieve

precipitaciones procedían de las nevadas, con un total de 40-43 cm de EAN de media anual (Shaban et al., 2004). Las mediciones *in situ* posteriores revelaron que la duración de la capa de nieve era de aproximadamente 160 días y la profundidad de la nieve de 50-80 cm en elevaciones superiores a 2 700 m s.n.m., lo que se traduce en 36-158 cm de EAN (Fayad et al., 2017). Del mismo modo, la duración de la capa de nieve a grandes altitudes suele superar los 90 días en las montañas del Atlas, lo que se traduce en 20 cm de EAN, que supera los 80 cm durante los años más húmedos (Hanich et al., 2022).

Los resultados de la modelización climática regional del dominio EURO-CORDEX (Jacob et al., 2013) se han utilizado para evaluar los efectos del cambio climático en la duración de la capa de nieve y la profundidad de la nieve en el Monte Líbano y las montañas del Atlas. El dominio se extendía por el Norte de África y la parte oriental del Mediterráneo con una resolución espacial de 12,5 km. Los modelos se seleccionaron en función de su idoneidad para analizar la duración de la cubierta de nieve y la profundidad de la nieve (Frei et al., 2018) y tomaron en consideración dos escenarios basados en vías de concentración representativas (RCP4.5 y RCP8.5).

Respecto al Monte Líbano y la Cordillera del Atlas, las proyecciones muestran una tendencia general a la disminución del manto de nieve, que casi desaparecerá a finales de este siglo. Las reducciones previstas de la duración de la capa de nieve oscilan entre el 7 % y el 10 % por década en el Monte Líbano (figura 7.9) y entre el 6 % y el 10 % en las montañas del Atlas (figura 7.10). Del mismo modo, se prevé que la profundidad de la nieve disminuya hasta un 9 % por década en ambos lugares (figuras 7.11 y 7.12).

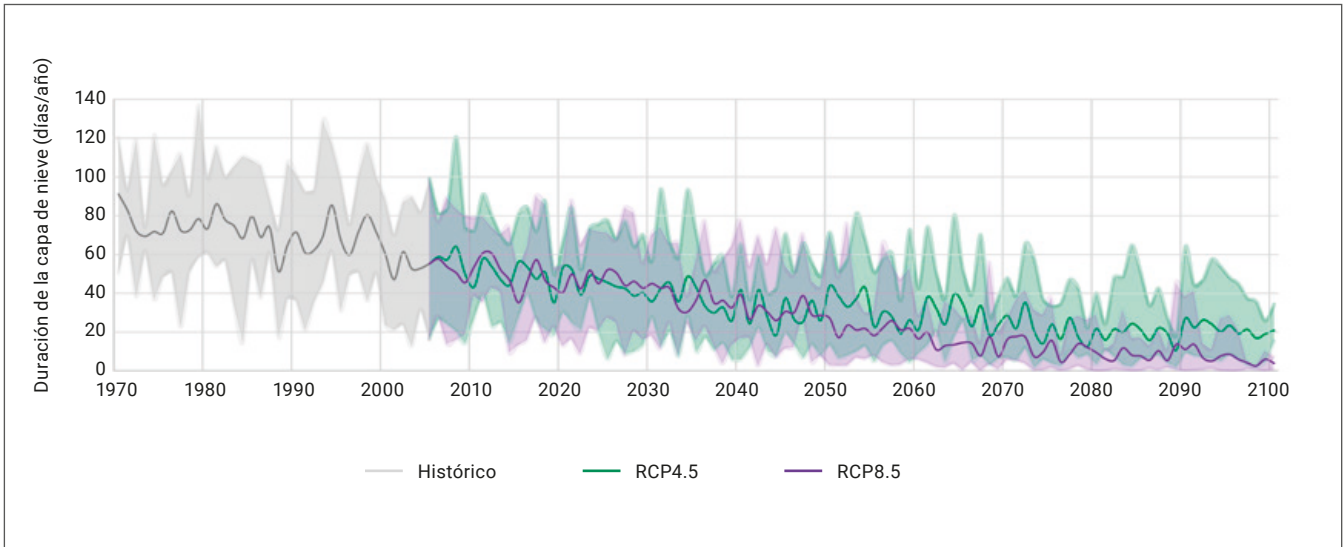
Un estudio realizado en el Monte Líbano coincide con esta afirmación y proyecta que la cota de nieve, que alcanza los 1 500 m s.n.m., se desplazará hasta los 1 700 m s.n.m. en 2050 y hasta los 1 900 m s.n.m. en 2090. Además del desplazamiento de la cota de nieve, esta se derretirá antes en primavera, lo que afectará a la recarga de los acuíferos y al caudal de los manantiales, reduciendo así el suministro de agua para riego (Ministerio de Medio Ambiente del Líbano/PNUD/GEF, 2015). Estas reducciones previstas de la capa de nieve señalan una disminución general del suministro de agua, concretamente durante la estación seca, cuando más se necesita para el riego. Los servicios de agua, saneamiento e higiene también pueden verse afectados por la reducción de los recursos hídricos globales a largo plazo.

7.5.2 Medidas de adaptación

La reducción de la duración de la capa de nieve y de su profundidad afectará gravemente la hidrología de la nieve, el EAN y la disponibilidad general de agua. Esto exige medidas de adaptación sólidas. El *Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* identificó varias condiciones propicias que podrían utilizarse para promover la adaptación al cambio climático en la región árabe. Estas incluyen el desarrollo de capacidades para aumentar el conocimiento sobre los impactos del cambio climático, el empoderamiento de los grupos vulnerables (por ejemplo, las mujeres y las comunidades rurales) como actores clave, y el uso de plataformas de pronóstico y predicción (IPCC, 2022).

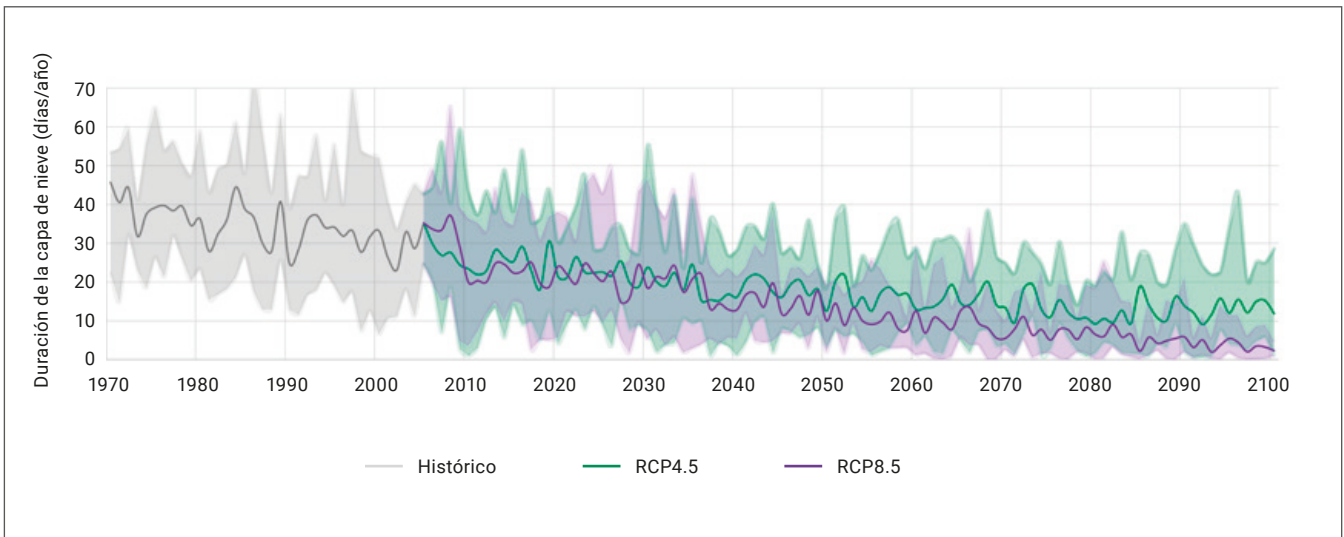
El sector de los servicios (incluido el turismo de invierno) emplea al 63 % de las mujeres trabajadoras en el Líbano. Por lo tanto, es crucial apoyar a las mujeres mediante el desarrollo de capacidades y la financiación de nuevas actividades económicas que les permitan adaptarse a la disminución prevista de las nevadas y el consiguiente impacto en las actividades de turismo invernal (CESPAO/UNFPA/NCLW, 2022). Las mujeres también representan el 43 % de la fuerza laboral agrícola en el Líbano y, por lo tanto, necesitarán programas y financiación para contrarrestar el impacto de la reducción del deshielo en los recursos hídricos para riego y sus ingresos (ONU-Mujeres, 2023).

Figura 7.9 Serie temporal de duración anual de la capa de nieve sobre el Monte Líbano (a más de 2 000 metros sobre el nivel del mar), 1970-2100



Fuente: autores, basado en un conjunto de seis resultados seleccionados de modelos climáticos regionales de EURO-CORDEX.

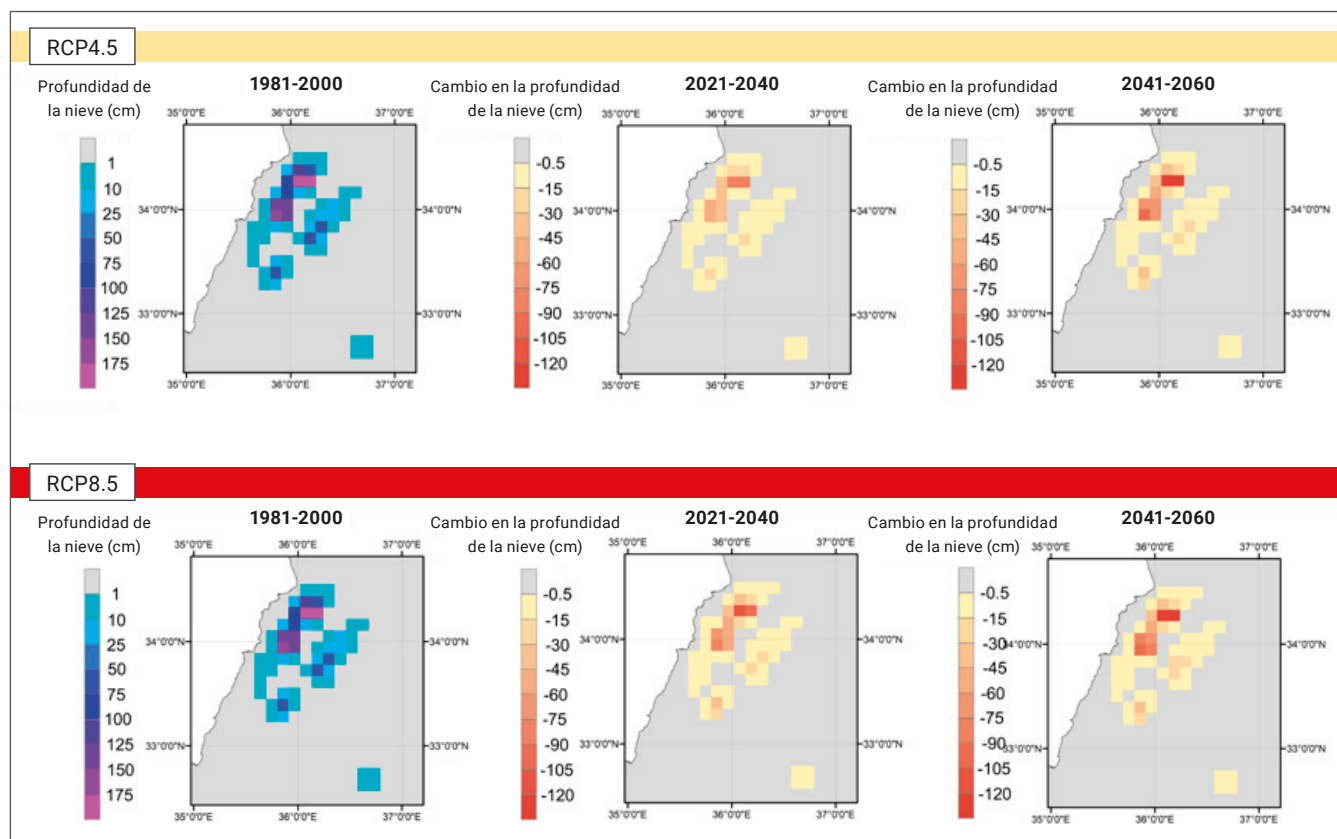
Figura 7.10 Serie temporal de duración anual de la capa de nieve en las montañas del Atlas (a más de 2 000 metros sobre el nivel del mar), 1970-2100



Fuente: autores, basado en un conjunto de seis resultados seleccionados de modelos climáticos regionales de EURO-CORDEX.

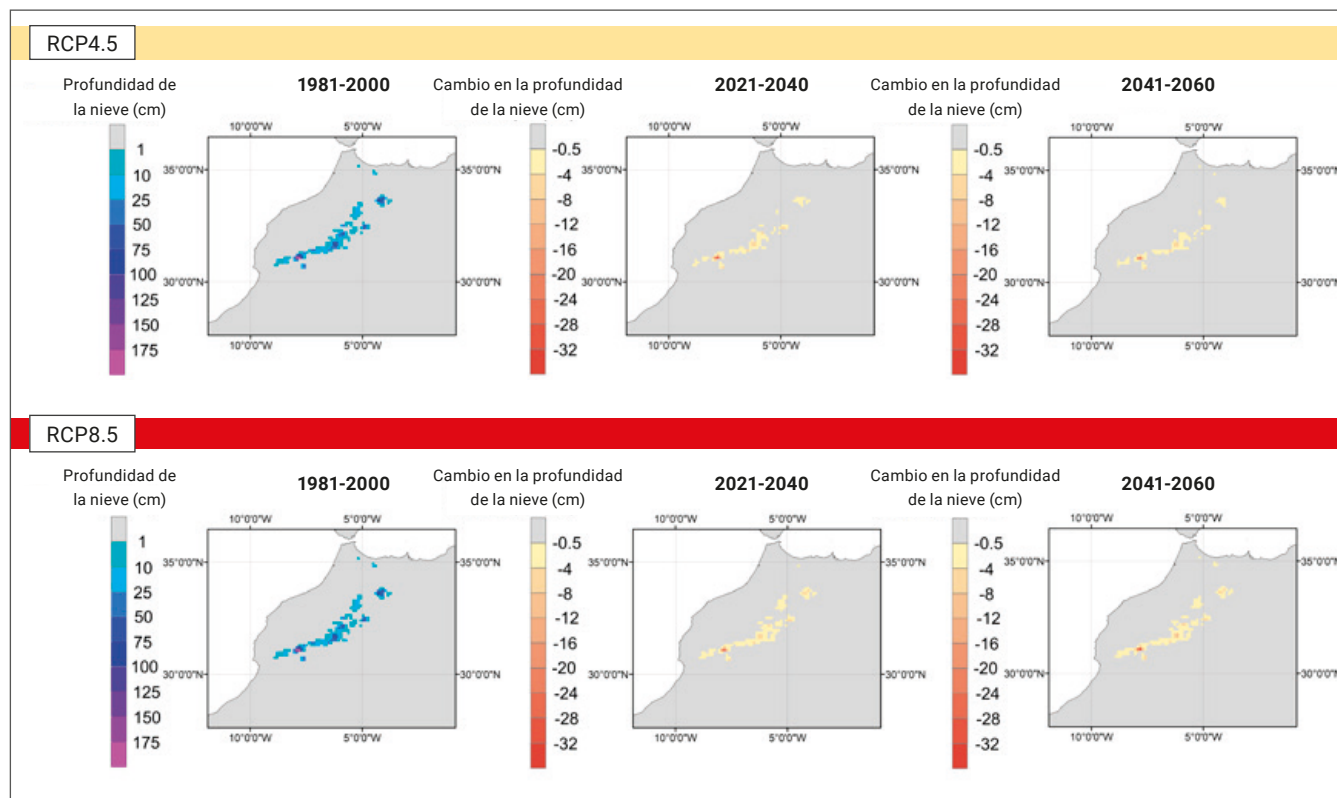
Para la cuenca del Nahr al Kalb en el Líbano, que incluye parte del Monte Líbano, se desarrolló un paquete en materia de diseño y resiliencia para la gestión de cuencas hidrográficas a prueba de cambios climáticos. El paquete está basado en modelos de pronóstico climático elaborados por la Iniciativa Regional para Evaluar el Impacto del Cambio Climático en los Recursos Hídricos y la Vulnerabilidad Socioeconómica en la Región Árabe. La cuenca incluye el municipio de Kfardebian, reconocido en 2024 como la capital del turismo invernal árabe. El cambio climático afectará negativamente a las comunidades que dependen económicamente del turismo invernal. Los impactos incluirán una reducción en los ingresos familiares de quienes dependen de los ingresos del turismo invernal debido a una temporada de esquí más corta y con menos turistas.

Figura 7.11 Cambio en la profundidad media estacional de la nieve (octubre-marzo) en el Monte Líbano durante los períodos 1981-2000, 2021-2040 y 2041-2060



Fuente: autores, basado en un conjunto de seis resultados seleccionados de modelos climáticos regionales de EURO-CORDEX.

Figura 7.12 Cambio en la profundidad media estacional de la nieve (octubre-marzo) en las montañas del Atlas durante los períodos 1981-2000, 2021-2040 y 2041-2060



Fuente: autores, basado en un conjunto de seis resultados seleccionados de modelos climáticos regionales de EURO-CORDEX.



La recarga gestionada de acuíferos es otra medida de adaptación para las cuencas hidrográficas que podría emplearse

El paquete en materia de diseño y resiliencia sugirió varias intervenciones, incluyendo la diversificación de los medios de vida mediante un turismo sostenible que se extienda más allá de las actividades invernales. Esto incluye la promoción del agroturismo y el ecoturismo basados en la naturaleza durante todo el año. Se recomendó a quienes son responsables de la formulación de políticas identificar y mapear los atractivos locales, brindar apoyo y desarrollo de capacidades a las empresas locales, desarrollar la infraestructura necesaria (por ejemplo, rehabilitar rutas de senderismo) y proporcionar materiales de comunicación adecuados para atraer visitantes. La cuenca también incluye tierras agrícolas, destinadas sobre todo al cultivo de manzanos y otros árboles frutales. Se recomienda la construcción de un lago en la montaña (un embalse) como una opción económicamente viable para aumentar el almacenamiento de agua y contribuir al riego durante la prolongada estación seca (CESPAO/ACSAD/Ministerio de Energía y Agua del Líbano/FAO, 2022). Este es un ejemplo del trabajo que se está realizando para apoyar a las poblaciones y comunidades de montaña mientras enfrentan los impactos irreversibles del cambio climático y la disminución de importantes recursos hídricos. Las mismas actividades sugeridas pueden ayudar a mitigar los impactos ambientales negativos del intenso turismo invernal, que ha provocado un aumento de la contaminación, la deforestación y la reducción de la calidad de la nieve en zonas del Líbano como Tannourine (Delly, 2024).

La recarga gestionada de acuíferos es otra medida de adaptación para las cuencas hidrográficas que podría emplearse en escenarios similares. La captación de agua podría utilizarse en invierno para mitigar la disminución de la disponibilidad de agua en verano derivada de los impactos del cambio climático en las zonas montañosas de la región árabe, incluida la pérdida de la capa de nieve.

En Marruecos, las estrategias de desarrollo rural deben adaptarse mejor al cambio climático para mejorar la resiliencia territorial y de los medios de vida, dado que el cambio climático afecta la cobertura de nieve y la disponibilidad de agua en las comunidades de montaña. Esto requiere mejorar la disponibilidad de datos que reflejen las diferentes visiones y prioridades de los actores involucrados en el desarrollo rural. El Plan Marruecos Verde, establecido en 2008, está impulsando el surgimiento de una nueva política para la gestión de los recursos naturales y la promoción del conocimiento indígena en relación con la gestión de los ecosistemas. El plan promueve medidas de adaptación ante el cambio climático. Su objetivo es mejorar la agricultura a pequeña escala en zonas marginales mediante el subsidio a la plantación de árboles en terrenos en pendiente y la implementación de técnicas de ahorro de agua, como el riego por goteo, como respuesta adaptativa al cambio climático y a la disminución prevista de los recursos hídricos disponibles (Agence pour le développement agricole, s.f.). Este desarrollo depende de la gestión integrada de los recursos ambientales (agua, bosques, suelo, etc.) a escala de grandes cuencas hidrográficas para abordar la diversa disponibilidad y demanda de agua en las zonas de montaña y llanura.

7.5.3 Conclusiones

Los impactos del cambio climático en las nevadas y precipitaciones estacionales, y por ende en la disponibilidad general de agua en la región árabe, ya son evidentes y es probable que se agraven en el futuro. La capa de nieve desempeña un papel crucial en el almacenamiento de agua para su liberación durante la estación seca. Sin embargo, está disminuyendo debido al cambio climático. En el contexto de las comunidades de montaña de la región árabe en general, y en particular en el Líbano y Marruecos, esto afectará actividades económicas como el turismo y la agricultura. De cara al futuro, se necesitan medidas intersectoriales de adaptación climática, como las SBN, técnicas de riego y selección de cultivos más eficientes, y estrategias inteligentes de diversificación económica para abordar los desafíos.

Referencias

- Adhikari, U., Nejadhashemi, A. P. y Herman, M. R. 2015. A review of climate change impacts on water resources in East Africa. *Transactions of the ASABE*, Vol. 58, No. 6, pp. 1493-1507. doi.org/10.13031/trans.58.10907.
- Adler, C., Wester, P., Bhatt, I., Huggel, C., Insarov, G., Morecroft, M., Muccione, V. y Prakash, A. 2022. Mountains. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösckke, V. Möller, A. Okem y B. Rama (eds), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribución del Grupo de Trabajo II al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge, Reino Unido/Nueva York, Cambridge University Press, pp. 2273-2318. doi.org/10.1017/9781009325844.022.
- Agence pour le développement agricole. s.f. Approches de mise en œuvre des deux piliers du Plan Maroc Vert [Enfoques para la implementación de los dos pilares del Plan Marruecos Verde]. Sitio web del Agence pour le développement agricole. www.ada.gov.ma/fr/approches-de-mise-en-oeuvre-des-deux-piliers-du-pmv.
- Aguas Andinas. 2024. *Resumen de Información ESG*. www.aguasandinasinversionistas.cl/~media/Files/A/Aguas-IR-v2/sustainability-reports/es/2023/ESG%20INFORMATION%20SUMMARY%202023%20sv%20-%20Espaol.pdf.
- AIE (Agencia Internacional de la Energía). 2021. *Climate Impacts on Latin American Hydropower*. Paris, AIE. www.iea.org/reports/climate-impacts-on-latin-american-hydropower.
- Alberton, M., Andresen, M., Citadino, F., Egerer, H., Fritsch, U., Götsch, H., Hoffmann, C., Klemm, J., Mitrofanenko, A., Musco, E., Noellenburg, N., Pettita, M., Renner, K. y Zebisch, M. 2017. *Outlook on Climate Change Adaptation in the Carpathian Mountains*. Mountain Adaptation Outlook Series. Nairobi/Viena/Arendal, Noruega/Bolzano, Italia, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA)/GRID-Arendal/Eurac Research. www.grida.no/publications/381.
- Alford, D., Kamp, U. y Pan, C. 2015. *The Role of Glaciers in the Hydrologic Regime of the Amu Darya and Syr Darya Basins*. Report No. ACS12128. Washington DC, Grupo del Banco Mundial. openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/94d8d53f-c8ff-53c7-899b-3d01f5eb8c85/content.
- Alianza para las Montañas. 2013. *Por qué las montañas son importantes para la energía: Una llamada a la acción en favor de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/07b9ce71-c48f-4386-9bfc-7eefaf434f2d/content.
- Altomonte, H. y Sánchez, R. J. 2016. *Hacia una Nueva Gobernanza de los Recursos Naturales en América Latina y el Caribe*. Libros de la CEPAL No. 139 LC/G.2679-P. Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). www.cepal.org/es/publicaciones/40157-nueva-gobernanza-recursos-naturales-america-latina-caribe.
- Alweny, S., Nsengiyumva, P. y Gatarabirwa, W. 2014. *Africa Sustainable Mountain Development Technical Report No. 1*. Kampala/Cambridge, Reino Unido, Albertine Rift Conservation Society (ARCOS). doi.org/10.13140/RG.2.2.11656.16640.
- Ariza, C., Maselli, D. y Kohler, T. 2013. *Mountains: Our Life, Our Future. Progress and Perspectives on Sustainable Mountain Development from Rio 1992 to Rio 2012 and Beyond*. Berna, Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE)/Centro para el Desarrollo y el Medio Ambiente (CDE). boris.unibe.ch/47827/1/Mountain_Synthesis_Report.pdf.
- Autoridad de Gestión de la Cuenca de los Ríos Bug Occidental y Sian en Ucrania. Inédito. Información obtenida de N. Kruta, Autoridad de Gestión de la Cuenca de los Ríos Bug Occidental y Sian, comunicación privada, 14 de mayo de 2024.
- Autoridad de Gestión de la Cuenca del Dniéster. 2024. З Міжнародним днем Дністра! [Feliz Día Internacional del Dniéster!]. Sitio web de la Autoridad de Gestión de la Cuenca del Dniéster vodaif.gov.ua/z-mizhnarodnym-dnem-dnistra-2/ (en ucraniano; consultado el 27 de noviembre de 2024).
- Awange, J. 2022. GHA's water tower: Ethiopian highlands. *Food Insecurity & Hydro-Climate in Greater Horn of Africa: Potential for Agriculture Amidst Extremes*. Cham, Suiza, Springer, pp. 107-142. doi.org/10.1007/978-3-030-91002-0_6.
- Banco Mundial. 2023. Madagascar: Making an Impact on Land Reform and Agriculture. Results Briefs. Sitio web del Grupo del Banco Mundial. www.worldbank.org/en/results/2023/11/19/madagascar-making-an-impact-on-land-reform-and-agriculture.
- . s.f. World Bank Group Data. Agriculture, forestry, and fishing, value added (% of GDP) – Madagascar. Sitio web del Grupo del Banco Mundial. data.worldbank.org/indicator/NV.AGR.TOTL.ZS?end=2023&locations=MG&start=2023&view=bar (consultado el 29 de noviembre de 2024).
- Banks, J. R., Heinold, B. y Schepanski, K. 2022. Impacts of the desiccation of the Aral Sea on the Central Asian dust life-cycle. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 127, No. 21, Artículo e2022JD036618. doi.org/10.1029/2022JD036618.
- BID (Banco Interamericano de Desarrollo). 2020. *Innovaciones de impacto: Lecciones sobre adaptación al cambio climático de la agricultura familiar en América Latina y el Caribe*. Concurso de Casos Exitosos 2015. Washington DC, BID. publications.iadb.org/es/innovaciones-de-impacto-lecciones-sobre-adaptacion-al-cambio-climatico-de-la-agricultura-familiar.
- Bodin, X. 2019. Impactos de la evolución de los glaciares rocosos en los Andes semi-áridos. M. Turrel, Luis Lliboutry – *El Hombre que Descubrió los Glaciares*. Santiago, Aguas Andinas, pp. 241-242. hal.science/hal-03083932.
- Bown, F., Rivera, A. y Acuña, C. 2008. Recent glacier variations at the Aconcagua basin, Central Chilean Andes. *Annals of Glaciology*, Vol. 48, pp. 43-48. doi.org/10.3189/172756408784700572.
- Bretas, F., Casanova, G., Crisman, T., Embid, A., Martin, L., Miralles, F. y Muñoz, R. 2020. *Agua para el Futuro: Estrategia de Seguridad Hídrica para América Latina y el Caribe*. Banco Interamericano de Desarrollo (BID). doi.org/10.18235/0002816.
- Cajar. 2024. Alerta urgente: Sobre desplazamiento forzado masivo del pueblo Wiwa de la Sierra Nevada de Santa Marta. Sitio web de Cajar, 27 de febrero de 2024. www.colectivodeabogados.org/organizaciones-de-derechos-humanos-denunciamos-desplazamiento-masivo-del-pueblo-indigena-wiwa-de-la-snsm-alerta-urgente/.
- Canal Capital. 2023. ¿De dónde viene el agua que consumimos en Bogotá? Sitio web de Canal Capital, 30 de agosto de 2023. www.canalcapital.gov.co/eureka/donde-viene-el-agua-de-bogota.
- Canales Sierra, L. 2018. *Construcción de Diques para la Cosecha de Agua en Lagunas Periglaciares*. Lima, CARE Perú.
- CAO/PNUMA/GRID-Arendal (Comunidad de África Oriental/Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente/GRID-Arendal). 2016. *Sustainable Mountain Development in East Africa in a Changing Climate*. Mountain Adaptation Outlook Series. Arusha, República Unida de Tanzania/Nairobi/Arendal, Noruega, CAO /PNUMA/GRID-Arendal. www.grida.no/publications/119.
- Capitani, C., Garedew, W., Mitiku, A., Berecha, G., Hailu, B. T., Heiskanen, J., Hurskainen, P., Platts, P. J., Siljander, M., Pinard, F., Johansson, T. y Marchant, R. 2019. Views from two mountains: Exploring climate change

- impacts on traditional farming communities of Eastern Africa highlands through participatory scenarios. *Sustainability Science*, Vol. 14, pp. 91-203. doi.org/10.1007/s11625-018-0622-x.
- Caretta, M. A., Mukherji, A., Arfanuzzaman, M., Betts, R. A., Gelfan, A., Hirabayashi, Y., Lissner, T. K., Liu, J., Lopez Gunn, E., Morgan, R., Mwanga, S. y Supratid, S. 2022. Water. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem y B. Rama (eds), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribución del Grupo de Trabajo II al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge, Reino Unido/Nueva York, Cambridge University Press, pp. 551-712. doi.org/10.1017/9781009325844.006.
- CAWater-info (Portal de información sobre el agua y el medio ambiente en Asia Central). s.f. Knowledge Base. Degradation of Glaciers. Sitio web de CAWater-info. Comisión Interestatal de Coordinación de los Recursos Hídricos de Asia Central (ICWC). cawater-info.net/bk/7-3_e.htm (consultado el 27 de noviembre de 2024).
- CEPAL (Comisión Económica de las Naciones Unidas para América Latina y el Caribe). 2024. CEPALSTAT: Statistical Databases and Publications. Sitio web de la CEPAL. statistics.cepal.org/portal/cepalstat/dashboard.html?theme=2&lang=en (consultado el 10 de junio de 2024).
- CESPAO (Comisión Económica y Social de las Naciones Unidas para Asia Occidental). 2022. *Groundwater in the Arab Region – ESCWA Water Development Report 9*. Beirut, Naciones Unidas. www.unescwa.org/publications/water-development-report-9.
- CESPAO (Comisión Económica y Social de las Naciones Unidas para Asia Occidental) et al. 2017. *Arab Climate Change Assessment Report – Main Report*. Beirut, Naciones Unidas. www.unescwa.org/publications/riccar-arab-climate-change-assessment-report.
- CESPAO/ACSAD/Ministerio de Energía y Agua del Líbano/FAO (Comisión Económica y Social de las Naciones Unidas para Asia Occidental/ Centro Árabe para el Estudio de Zonas Áridas y Tierras Secas/Ministerio de Energía y Agua del Líbano/Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2022. *Climate-Proof Watershed Management Design and Resilience Package: Nahr el Kalb Basin*. Informe técnico de la Iniciativa Regional para la Evaluación de los Impactos del Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos y la Vulnerabilidad Socioeconómica en la Región Árabe. Beirut, Naciones Unidas. www.unescwa.org/sites/default/files/pubs/pdf/climate-proof-watershed-management-design-resilience-nahr-el-kalb_0.pdf.
- CESPAP/UNFPA/NCLW (Comisión Económica y Social de las Naciones Unidas para Asia Occidental /Fondo de Población de las Naciones Unidas/Comisión Nacional para las Mujeres Libanesas). 2022. *Women's Economic Participation in Lebanon: A Mapping Analysis of Laws and Regulations*. Beirut, Naciones Unidas. www.unescwa.org/sites/default/files/pubs/pdf/women-economic-participation-lebanon-mapping-analysis-laws-english.pdf.
- CESPAP/PNUMA/OIT/Centro de Colaboración Regional de Asia y el Pacífico de la CMNUCC/ONUDI (Comisión Económica y Social para Asia y el Pacífico/Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente/Organización Internacional del Trabajo/Centro de Colaboración Regional de Asia y el Pacífico de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático/Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial). 2023. *2023 Review of Climate Ambition in Asia and the Pacific: Just Transition Towards Regional Net-Zero Climate Resilient Development*. Naciones Unidas. www.unescap.org/kp/2023/2023-review-climate-ambition-asia-and-pacific-just-transition-towards-regional-net-zero.
- Chaperon, P., Danloux, J. y Ferry, L. 1993. *Fleuves et rivières de Madagascar – Ony sy renirano eto Madagasikara* [Ríos y cursos de agua de Madagascar]. Collection Monographies hydrologiques, No. 10. París, ORSTOM (en francés).
- Chen, Z., Gao, X. y Lei, J. 2022. Dust emission and transport in the Aral Sea region. *Geoderma*, Vol. 428, Artículo 116177. doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116177.
- CHR (Comisión Internacional para la Hidrología de la Cuenca del Rin). 2022. When the Melt Water is Missing: More Often Low Water Expected in the Rhine in the Future. Sitio web del CHR, 11 de julio de 2022. www.chr-khr.org/en/news/when-melt-water-missing-more-often-low-water-expected-rhine-future.
- Climate-ADAPT. 2024. Adaptation in Carpathian Mountains. Sitio web de Climate-ADAPT. climate-adapt.eea.europa.eu/en/countries-regions/transnational-regions/carpathian-mountains/general (consultado el 12 de noviembre de 2024).
- Climate Diplomacy. 2022. How Much Progress Has Been Made on Kyrgyz-Uzbek Water Cooperation? Sitio web de Climate Diplomacy, 1 de julio de 2022. climate-diplomacy.org/magazine/cooperation/how-much-progress-has-been-made-kyrgyz-uzbek-water-cooperation.
- Comisión del Dniéster. 2024a. Working Group on Ecosystems and Biodiversity. Sitio web de la Comisión del Dniéster. dniester-commission.org/en/joint-management/dniester-commission/working-groups/working-group-on-ecosystems-and-biodiversity/.
- . 2024b. Working Group on Emergencies. Sitio web de la Comisión del Dniéster. dniester-commission.org/en/joint-management/dniester-commission/working-groups/working-group-on-emergencies/.
- Comisión del Río Mekong. s.f. Hydrometeorological Monitoring. Sitio web de la Comisión del Río Mekong. www.mrcmekong.org/our-work/functions/basin-monitoring/hydrometeorological-monitoring/.
- Comisión de Medio Ambiente y Bienes Nacionales. 2022. Proyecto de Ley sobre Protección de Glaciares. Boletines No. 11,876-12 y 4,205-12, refundidos. Congreso Nacional de Chile. www.camara.cl/legislacion/ProyectosDeLey/tramitacion.aspx?prmID=12397&prmBOLETIN=11876-12.
- Comisión Internacional para la Protección del Río Danubio. 2014. The ICPDR and its observers: Inspiring wider interaction with stakeholders. *Danube Watch*, pp. 25-27. www.icpdr.org/sites/default/files/nodes/documents/dw2014_1.pdf.
- . 2021. *Danube Flood Risk Management Plan: Update 2021*. Viena, Comisión Internacional para la Protección del Río Danubio. www.icpdr.org/sites/default/files/nodes/documents/dfrmp_update_2021_lores_0.pdf.
- Comité Ejecutivo del IFAS (Comité Ejecutivo del Fondo Internacional para Salvar el Mar de Aral). 2024. Water Resources. Sitio web del Comité Ejecutivo del IFAS. ecifas.kz/en/drugie-resursy/vodnye-resursy-basseynaralskogo-morya.
- Cullen, N. J., Sirguy, P., Mölg, T., Kaser, G., Winkler, M. y Fitzsimmons, S. J. 2013. A century of ice retreat on Kilimanjaro: The mapping reloaded. *The Cryosphere*, Vol. 7, No. 2, pp. 419-431. doi.org/10.5194/tc-7-419-2013.
- Delly, F. Z. 2024. Balancing tourism and environmental conservation in Lebanon's changing climate. *Beirut Political Review*, 28 de febrero de 2024. beirutpoliticalreview.org/publications/f/the-environment-tourism-and-lebanons-changing-climate.
- Descroix, L., Faty, B., Manga, S. P., Diedhiou, A. B., Lambert, L. A., Soumaré, S., Andrieu, J., Ogilvie, A., Fall, A., Mahé, G., Sombily Diallo, F. B., Diallo, A., Diallo, K., Albergel, J., Tanimoun, B. A., Amadou, I., Bader, J. C., Barry, A., Bodian, A., Boulvert, Y., Braquet, N., Couture, J. L., Dacosta, H., Dejacquelot, G., Diakité, M., Diallo, K., Gallese, E., Ferry, L., Konaté, L., Nka Nnomo, B., Olivry, J. C., Orange, D., Sakho, Y., Sambou, S. y Vandervaere, J. P. 2020. Are the Fouta Djallon highlands still the water tower of West Africa? *Water*, Vol. 12, No. 11, Artículo 2968. doi.org/10.3390/w12112968.
- Devenish, C. y Gianella, C. (eds). 2012. *20 years of Sustainable Mountain Development in the Andes: From Rio 1992 to 2012 and Beyond*. Informe regional. Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Corregión Andina (CONDESAN). openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/17b3c4fe-863e-4475-b12e-269d5578be58/content.
- Dickerson, S., Cannon, M. y O'Neill, B. 2021. Climate change risks to human development in Sub-Saharan Africa: A review of the literature. *Climate and Development*, Vol. 14, No. 6, pp. 1-19. doi.org/10.1080/17565529.2021.1951644.

- Doummar, J., Kassem, A. H. y Gurdak, J. J. 2018. Impact of historic and future climate on spring recharge and discharge based on an integrated numerical modelling approach: Application on a snow-governed semi-arid karst catchment area. *Journal of Hydrology*, Vol. 565, pp. 636-649. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.062.
- Dussailant, I., Berthier, E., Brun, F., Masiokas, M., Hugonnet, R., Favier, V., Rabatel, A., Pitte, P. y Ruiz, L. 2019. Two decades of glacier mass loss along the Andes. *Nature Geoscience*, Vol. 12, pp. 802-808. doi.org/10.1038/s41561-019-0432-5.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2000. 26ª Conferencia Regional de la FAO para América Latina y el Caribe, Mérida, México, 10-14 de abril de 2000. Desarrollo sostenible en zonas montañosas. www.fao.org/4/x4442s/x4442s.htm.
- . 2015. *Mapping the Vulnerability of Mountain Peoples to Food Insecurity*. Roma, FAO. openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i5175e.
- . s.f. AQUASTAT Dissemination System. Sitio web de la FAO. data.apps.fao.org/aquastat/?lang=en&share=f97207b8a-f0f7-4b27-8a0b-64ba7477c4e4 (consultado el 20 de noviembre de 2024).
- FAO/PNUMA (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura/Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). 2023. *Restoring Mountain Ecosystems: Challenges, Case Studies and Recommendations for Implementing the UN Decade Principles for Mountain Ecosystem Restoration*. Roma/Nairobi, FAO/PNUMA. doi.org/10.4060/cc9044en.
- Fayad, A. 2019. *Évaluation de la ressource en eau associée au manteau neigeux sur le mont Liban à partir d'observations et de la modélisation (Evaluación de los recursos hídricos de nieve en el Monte Líbano mediante observaciones y modelización)*. Tesis doctoral, hidrología, Universidad Paul Sabatier-Toulouse III, 2017. NNT: 2017TOU30364. tel-01755397v2. theses.hal.science/tel-01755397v2.
- Fayad, A., Gascoïn, S., Faour, G., Fanise, P., Drapeau, L., Somma, J., Fadel, A., Al Bidar, A. y Escadafal, R. 2017. Snow observations in Mount Lebanon (2011–2016). *Earth System Science Data*, Vol. 9, No. 2, pp. 573-587. doi.org/10.5194/essd-9-573-2017.
- FIDA (Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola). s.f. Madagascar. Sitio web del FIDA. www.ifad.org/en/w/countries/madagascar (consultado el 2 de diciembre de 2024).
- Frazier, A. G. y Brewington, L. 2020. Current changes in alpine ecosystems of Pacific Islands. *Encyclopedia of the World's Biomes*, pp. 607-619. Elsevier. doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11881-0.
- Frei, P., Kotlarski, S., Liniger, M. A. y Schär, C. 2018. Future snowfall in the Alps: Projections based on the EURO-CORDEX regional climate models. *The Cryosphere*, Vol. 12, No. 1, pp. 1-24. doi.org/10.5194/tc-12-1-2018.
- Gagné, K., Rasmussen, M. B. y Orlove, B. 2014. Glaciers and society: Attributions, perceptions, and valuations. *Wiley Interdisciplinary Reviews (WIREs): Climate Change*, Vol. 5, No. 6, pp. 793-808. doi.org/10.1002/wcc.315.
- García Pachón, M. P. 2018. La Conservación de Glaciares y Humedales como Ecosistemas Proveedores de Agua Dulce a Través del SINAP. Embid Irujo y M. P. García Pachón (eds), *La Conservación de la Naturaleza: Su Régimen Jurídico en Colombia y España*. Bogotá, Universidad Externado de Colombia, pp. 85-115. doi.org/10.57998/bdigital.handle.001.2118.
- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H. y Veloso-Águila, D. 2019. The central Chile mega drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, Vol. 40, No. 1, pp. 421-439. doi.org/10.1002/joc.6219.
- Ghosh, D. 2021. Alps Mountain Range. Sitio web del WorldAtlas, 18 de marzo de 2021. www.worldatlas.com/mountains/alps-mountain-range.html.
- GIZ (Sociedad Alemana para la Cooperación Internacional). 2021. *Regional Action Plan for a Joint Political Dialogue on Climate, Environment and Security*. GIZ. greencentralasia.org/en/category/regional-action-plan/
- . 2023. *Regional Climate Change Adaptation Strategy for Central Asia*. GIZ. greencentralasia.org/en/regional-climate-change-adaptation-strategy-in-central-asia/.
- Global Forest Watch. s.f. Madagascar. Sitio web de Global Forest Watch. www.globalforestwatch.org/dashboards/country/MDG/ (consultado el 2 de diciembre de 2024).
- Gobierno de Argentina. 2010. *Ley 26.639: Régimen de Presupuestos Mínimos para la Preservación de los Glaciares y del Ambiente Periglacial*. servicios.infoleg.gov.ar/infolegInternet/anexos/170000-174999/174117/norma.htm.
- González Molina, S. y Vacher, J.-J. (eds). 2014. *El Perú Frente al Cambio Climático: Resultados de Investigaciones Franco-peruanas*. Institut de Recherche pour le Développement (IRD). repositoriodigital.minam.gob.pe/handle/123456789/1029.
- Goodman, S. M., Raheerilalao, M. J. y Wohlhauser, S. (eds). 2021. *Les aires protégées terrestres de Madagascar: Leur histoire, description et biota [Las zonas terrestres protegidas de Madagascar: historia, descripción y biota]*. Antananarivo, Association Vahatra (en francés).
- Hanich, L., Chehbouni, A., Gascoïn, S., Boudhar, A., Jarlan, L., Trambly, Y., Boulet, G., Marchane, A., Baba, M. W., Kinnard, C., Simonneaux, V., Fakir, Y., Bouchaou, L., Leblanc, M., Le Page, M., Bouamri, H., Er-Raki, S. y Khabba, S. 2022. Snow hydrology in the Moroccan Atlas Mountains. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Vol. 42, Artículo 101101. doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101101.
- ICIMOD (Centro Internacional para la Ordenación Integrada de las Montañas). 2017. Reaching the Most Vulnerable Across the Border: Community-Based Flood Early Warning Systems. Sitio web del ICIMOD, 12 de agosto de 2017. www.icimod.org/article/reaching-the-most-vulnerable-across-the-border-community-based-flood-early-warning-systems/.
- . 2020. *The HKH Call to Action to Sustain Mountain Environments and Improve Livelihoods in the Hindu Kush Himalaya*. Resumen. Katmandú, ICIMOD. doi.org/10.53055/ICIMOD.1.
- . 2023. *Water, Ice, Society, and Ecosystems in the Hindu Kush Himalaya: An Outlook [P. Wester, S. Chaudhary, N. Chettri, M. Jackson, A. Maharjan, S. Nepal y J. F. Steiner (eds)]*. Katmandú, ICIMOD. doi.org/10.53055/ICIMOD.1028.
- . s.f. The Hindu Kush Himalaya Ministerial Mountain Summit 2020. Sitio web del ICIMOD. www.icimod.org/hkhmms/.
- ICPR (Comisión Internacional para la Protección del Rin). 2022. ICPR to Start Updating Climate Change Adaptation Strategy in Autumn 2022: Third Extreme Low Water in 20 Years Underlines Urgency. Sitio web de la ICPR, 15 de septiembre de 2022. www.iksr.org/en/press/press-releases/press-releases-individual-presentation/iksr-beginnt-ab-herbst-2022-mit-aktualisierung-der-strategie-zur-anpassung-an-den-klimawandel-drittes-extremes-niedrigwasser-in-20-jahren-unterstreicht-die-dringlichkeit?no_cache=1&sword_list%5B0%5D=glacier&cHash=18f033335f10a05898b0ef4a1ce973a2.
- IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). 2021. *Informe del Estado de los Glaciares Colombianos 2020*. Bogotá, IDEAM. www.siac.gov.co/glaciares.
- Immerzeel, W. W., Lutz, A. F., Andrade, M., Bahl, A., Biemans, H., Bolch, T., Hyde, S., Brumby, S., Davies, B. J., Elmore, A. C., Emmer, A., Feng, M., Fernández, A., Haritashya, U., Kargel, J. S., Koppes, M., Kraaijenbrink, P. D. A., Kulkarni, A. V., Mayewski, P. A., Nepal, S., Pacheco, P., Painter, T. H., Pellicciotti, F., Rajaram, H., Rupper, S., Sinisalo, A., Shrestha, A. B., Viviroli, D., Wada, Y., Xiao, C., Yao, T. y Baillie, J. E. M. 2020. Importance and vulnerability of the world's water towers. *Nature*, Vol. 577, No. 7790, pp. 364-369. doi.org/10.1038/s41586-019-1822-y.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2022. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribución del Grupo de Trabajo II al Sexto Informe de Evaluación del

- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. [H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem y B. Rama (eds)]. Cambridge, Reino Unido/Nueva York, Cambridge University Press. doi.org/10.1017/9781009325844.
- Jackson, M., Azam, M. F., Baral, P., Benestad, R., Brun, F., Muhammad, S., Pradhananga, S., Shrestha, F., Steiner, J. F. y Thapa, A. 2023. Consequences of climate change for the cryosphere in the Hindu Kush Himalaya. P. Wester, S. Chaudhary, N. Chettri, M. Jackson, A. Maharjan, S. Nepal y J. F. Steiner (eds), *Water, Ice, Society, and Ecosystems in the Hindu Kush Himalaya: An Outlook*. Katmandú, Centro Internacional para la Ordenación Integrada de las Montañas (ICIMOD), pp. 17-71. doi.org/10.53055/ICIMOD.1030.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Bössing Christensen, O., Bouwer, L. M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Kröner, N., Kotlarski, S., Kriegsmann, A., Martin, E., van Meijgaard, E., Moseley, C., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussana, J., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B. y Yiou, P. 2013. EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, Vol. 14, pp. 563-578. doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2.
- Jorio, L. y Reusser, K. 2019. Glaciers and the Changing Landscape in the Alps. Sitio web de Swissinfo.ch, 26 de agosto de 2019. www.swissinfo.ch/eng/sci-tech/swiss-glaciers-series-3-000-4-500-metres-glaciers-and-the-changing-landscape-in-the-alps/45181238.
- JPL (Jet Propulsion Laboratory). 2004. Photojournal. Sitio web del JPL. National Aeronautics and Space Administration (NASA). photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/pia04965.
- Kang, S., Zhang, Y., Qian, Y. y Wang, H. 2020. A review of black carbon in snow and ice and its impact on the cryosphere. *Earth-Science Reviews*, Vol. 210, Artículo 103346. doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103346.
- Kanui, I., Kibwage, T. y Murangiri, M. R. 2016. Water tower ecosystems services and diversification of livelihood activities to neighbouring communities: A case study of Chyulu Hills water tower in Kenya. *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, Vol. 6, No. 4, pp. 1-12. doi.org/10.9734/JGEEI/2016/26620.
- Kennedy, C. M., Fariss, B., Oakleaf, J. R., Fa, J. E., Baruch-Mordo, S. y Kiesecker, J. 2023. Indigenous Peoples' lands are threatened by industrial development; Conversion risk assessment reveals need to support Indigenous stewardship. *One Earth*, Vol. 6, pp. 1032-1049. doi.org/10.1016/j.oneear.2023.07.006.
- Kiplagat, J. K., Wang, R. Z. y Li, T. X. 2011. Renewable energy in Kenya: Resource potential and status of exploitation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 6, pp. 2960-2973. doi.org/10.1016/j.rser.2011.03.023.
- Klein, R. J. T., Midgley, G. F., Preston, B. L., Alam, M., Berkhout, F. G. H., Dow, K. y Shaw, M. R. 2014. Adaptation opportunities, constraints, and limits. C. B. Field, 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), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*. Contribución del Grupo de Trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge, Reino Unido/Nueva York, Cambridge University Press, pp. 899-943. doi.org/10.1017/CBO9781107415379.021.
- Laurent, L., Buoncristiani, J.-F., Pohl, B., Zekollari, H., Farinotti, D., Huss, M., Mugnier, J.-L. y Pergaud, J. 2020. The impact of climate change and glacier mass loss on the hydrology in the Mont-Blanc massif. *Scientific Reports*, Vol. 10, Artículo 10420. doi.org/10.1038/s41598-020-67379-7.
- Lourenco, M. y Woodborne, S. 2023. Defining the Angolan Highlands Water Tower, a 40 plus-year precipitation budget of the headwater catchments of the Okavango Delta. *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 195, No. 7, p. 859. doi.org/10.1007/s10661-023-11448-7.
- Ludwig-Maximilians-Universität de Múnich. 2018. *Revision and Update of the Danube Study*. Informe final elaborado por encargo del Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza, Construcción y Seguridad Nuclear de Alemania. Ludwig-Maximilians-Universität de Múnich y Comisión Internacional para la Protección del Río Danubio. www.icpdr.org/sites/default/files/nodes/documents/danube_climate_adaptation_study_2018.pdf.
- Magrin, G. O., Marengo, J. A., Boulanger, J.-P., Buckeridge, M. S., Castellanos, E., Poveda, G., Scarano, F. R. y Vicuña, S. 2014. Central and South America. V. R. Barros, C. B. Field, D. J. Dokken, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, 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), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects*. Contribución del Grupo de Trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge, Reino Unido/Nueva York Cambridge University Press, pp. 1499-1566. www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-PartB_FINAL.pdf.
- Mani, M. (ed.). 2021. *Glaciers of the Himalayas: Climate Change, Black Carbon, and Regional Resilience*. Foro de Desarrollo de Asia Meridional. Washington DC, Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento/Grupo del Banco Mundial. openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/ff8b1264-d631-5d3d-814f-80f509c82aa9/content.
- Ministerio de Bienes Nacionales de Chile. 2023. Decreto 25 - Crea el "Parque Nacional Glaciares de Santiago", en la Comuna de San José de Maipo, Provincia de Cordillera, Región Metropolitana. Sitio web del Ministerio de Bienes Nacionales de Chile. www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1195043.
- Ministerio de Clima y Medio Ambiente de Polonia. 2022. Impact of War on Natural Environment of the Carpathians in Ukraine. Departamento de Conservación de la Naturaleza. www.gov.pl/attachment/9ed63b69-87d8-4c52-a74a-1c88385f5508.
- Ministerio de Energía y Minas del Ecuador. s.f. Ecuador consolida la producción eléctrica a partir de fuentes renovables. Sitio web del Ministerio de Energía y Minas del Ecuador. www.recursoyenergia.gob.ec/ecuador-consolida-la-produccion-electrica-a-partir-de-fuentes-renovables/#:~:text=Bajo%20este%20precepto%2C%20es%20importante,%2C%20geotermia%2C%20entre%20otras.
- Ministerio de Medio Ambiente del Líbano/PNUD/GEF (Ministerio de Medio Ambiente del Líbano/Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo/Global Environment Facility). 2015. *Economic Costs to Lebanon from Climate Change: A First Look*. Beirut, Ministerio de Medio Ambiente del Líbano/PNUD. www.studies.gov.lb/getattachment/Sectors/Environment/2016/ENV-16-11/env-16-11.pdf.
- Ministerio de Obras Públicas de Chile. 2023. *Dirección General de Aguas del MOP instala dos nuevas estaciones glaciológicas en la región de Magallanes y de la Antártica Chilena*. dga.mop.gob.cl/noticias/Paginas/DetalledeNoticias.aspx?item=1010.
- Ministerio de Relaciones Exteriores del Estado Plurinacional de Bolivia. 2023. Bolivia fortalece el sistema de monitoreo de glaciares andinos. Sitio web del Ministerio de Relaciones Exteriores del Estado Plurinacional de Bolivia, 31 de octubre de 2023. cancilleria.gob.bo/mre/2023/10/31/11918/.
- Mosello, B., Foong, A., Viehoff, A. y Rüttinger, L. 2023. *Regional Consultation on Climate Change and Security in Central Asia*. Berlín/Viena, Adelphi Research/Organización para la Seguridad y la Cooperación en Europa (OSCE). adelphi.de/system/files/document/Regional%20consultation%20on%20climate%20change%20and%20security%20in%20central%20asia.pdf.
- MRI/GEO Mountains (Iniciativa para el Estudio de las Montañas/GEO Mountains). 2023. *MRI Mountain Observatories Working Group & GEO Mountains Workshop in Central Asia: Workshop Report*. Almaty, Kazajstán, 18-20 de abril de 2023. doi.org/10.48350/183023.
- Mwangi, K. K., Musili, A. M., Otieno, V. A., Endris, H. S., Sabiiti, G., Hassan, M. A., Tsehayu, A. T., Guleid, A., Atheru, Z., Guzha, A. C., De Meo, T., Smith, N., Lubanga Mkanji, D., Kerkering, J., Doud, B. y Kanyanya, E. 2020. Vulnerability of Kenya's water towers to future climate change:

- An assessment to inform decision making in watershed management. *American Journal of Climate Change*, Vol. 9, No. 3, pp. 317-353. doi.org/10.4236/ajcc.2020.93020.
- Naciones Unidas. 2024. *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2024: Agua para la prosperidad y la paz*. París, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000391195.
- . s.f. Progresos en la cooperación en materia de aguas transfronterizas (objetivo 6.5 de los ODS). Sitio web de los datos del ODS 6. sdg6data.org/es/indicador/6.5.2 (consultado el 3 de septiembre de 2024).
- Nsengiyumva, P. 2019. African mountains in a changing climate: Trends, impacts, and adaptation solutions. *Mountain Research and Development*, Vol. 39, No. 2, pp. 1-8. doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-19-00062.1.
- Nyingi, D. W., Gichuki, N. y Ogada, M. O. 2013. Freshwater ecology of Kenyan highlands and lowlands. P. Paron, D. O. Olago y C. T. Omuto (eds), *Developments in Earth Surface Processes*, Vol. 16, pp. 199-218. doi.org/10.1016/B978-0-444-59559-1.00016-5.
- Olmos, X. 2017. *Sostenibilidad Ambiental en las Exportaciones Agroalimentarias: Un Panorama de América Latina*. Documento del proyecto. Santiago, Comisión Económica de las Naciones Unidas para América Latina y el Caribe (CEPAL). repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/a63d47d6-c0c5-4a0a-93bd-456f684d1739/content.
- OMM (Organización Meteorológica Mundial). 2022. *The State of the Climate in Africa 2021*. WMO-No. 1300. Ginebra, OMM. library.wmo.int/idurl/4/58070.
- . 2023. *Estado del clima en América Latina y el Caribe 2022*. WMO-No. 1322. Ginebra, OMM. library.wmo.int/idurl/4/66322.
- . 2024a. *State of the Climate in Africa 2023*. WMO-No. 1360. Ginebra, OMM. library.wmo.int/idurl/4/69000.
- . 2024b. *1st Third Pole Climate Forum Consensus Statement (TPCF-1)*. Foro Regional sobre el Clima del Tercer Polo, Lijiang, China, 4-6 de junio de 2024. reliefweb.int/report/afghanistan/1st-third-pole-climate-forum-consensus-statement-tpcf-1-summary-climate-december-2023-april-2024-and-climate-outlook-june-september-2024.
- Ontumbi, G. M. y Sanga, J. K. 2018. Kenya's water towers; A scenario scrutiny of Njoro sub catchment, Eastern Mau towers. *International Journal of Scientific and Technological Research (IJSTER)*, Vol. 1, No. 1, pp. 6-15.
- ONU-Mujeres. 2023. *Women in the Agro-Food Sector in Lebanon: A Review of the Legislative Framework*. Beirut, ONU-Mujeres. arabstates.unwomen.org/sites/default/files/2023-12/psdp-legislativeframework.pdf.
- Ownby, J. 2024. La crisis hídrica de Bogotá: "Solo nos puede salvar el cielo". Sitio web de El País, 18 de abril de 2024. elpais.com/america-colombia/2024-04-18/la-crisis-hidrica-de-bogota-solo-nos-puede-salvar-el-cielo.html.
- PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). 2019. *DECOIN: Ecuador*. Estudios de Caso de la Iniciativa Ecuatorial. Nueva York, PNUD. www.equatorinitiative.org/wp-content/uploads/2019/12/DECOIN-Ecuador-Spanish-1.pdf.
- PNUD/ENVSEC (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo/Iniciativa sobre Medio Ambiente y Seguridad). 2011. *The Glaciers of Central Asia: A Disappearing Resource*. PNUD. cawater-info.net/pdf/glaciers_of_central_asia.pdf.
- PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). 2010. *Africa Water Atlas*. Nairobi, División de Evaluación y Alerta Temprana, PNUMA. na.unep.net/atlas/viewAtlasBookWithID.php?atlasID=1112.
- . 2012. *Sustainable Mountain Development. RIO 2012 and Beyond. Why Mountains Matter for Africa*. PNUMA. openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/1278fa8d-0853-4aef-a2af-c935cb643428/content.
- . 2014. *Africa Mountains Atlas*. Nairobi, PNUMA. wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/9301.
- . 2022a. *The Environmental Impact of the Conflict in Ukraine: A Preliminary Review*. EO/2466/NA. Nairobi, PNUMA. wedocs.unep.org/20.500.11822/40746.
- . 2022b. *A Scientific Assessment of the Third Pole Environment*. Nairobi, PNUMA. www.unep.org/resources/report/scientific-assessment-third-pole-environment.
- . 2023a. The Carpathian Convention Marks its 20th Anniversary with a New Biodiversity Framework and a Transboundary Protected Wetland. Sitio web del PNUMA, 12 de octubre de 2023. www.unep.org/news-and-stories/press-release/carpathian-convention-marks-its-20th-anniversary-new-biodiversity.
- . 2023b. Shrinking Glaciers Upend Lives Across South America. Sitio web del PNUMA, 15 de marzo de 2023. www.unep.org/news-and-stories/story/shrinking-glaciers-upend-lives-across-south-america.
- Pohl, B., Kramer, A., Hull, W., Blumstein, S., Abdullaev, I., Kazbekov, J., Reznikova, T., Strikeleva, E., Interwies, E. y Görlitz, S. 2017. *Rethinking Water in Central Asia: The Costs of Inaction and Benefits of Water Cooperation*. Adelphi/CAREC. carececo.org/Rethinking%20Water%20in%20Central%20Asia.pdf.
- Prinz, R., Nicholson, L. I., Mölg, T., Gurgiser, W. y Kaser, G. 2016. Climatic controls and climate proxy potential of Lewis Glacier, Mt. Kenya. *The Cryosphere*, Vol. 10, No. 1, pp. 133-148. doi.org/10.5194/tc-10-133-2016.
- Reyes Haczek, A. 2022. Venezuela ya se quedó sin glaciares. ¿Qué pasa en el resto de la región? Sitio web de CNN, 5 de agosto 2022. cnnspanol.cnn.com/2022/08/05/glaciares-nivel-del-mar-america-latina-caribe-omm-orix/.
- Robbins, J. 2019. The West's Great River Hits its Limits: Will the Colorado Run Dry? Sitio web de Yale Environment 360, 14 de enero de 2019. e360.yale.edu/features/the-west-s-great-river-hits-its-limits-will-the-colorado-run-dry.
- Romeo, R., Grita, F., Parisi, F. y Russo, L. 2020. *Vulnerability of Mountain Peoples to Food Insecurity: Updated Data and Analysis of Drivers*. Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)/Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CLD). doi.org/10.4060/cb2409en.
- Ruggeri, A. 2023. Could Giant Blankets and Other Extreme Actions Save Glaciers? Sitio web de Scientific American, 6 de marzo de 2023. www.scientificamerican.com/article/could-giant-blankets-and-other-extreme-actions-save-glaciers/.
- Russell, M. 2018. *Water in Central Asia: An Increasingly Scarce Resource*. Unión Europea. www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2018/625181/EPRS_BRI(2018)625181_EN.pdf.
- Samaniego, J., Galindo, L. M., Mostacedo Marasovic, S. J., Ferrer Carbonell, J., Alatorre, J. E. y Reyes, O. 2017. *Adaptación al Cambio Climático en el Sector Agropecuario en América Latina y el Caribe: Síntesis de Políticas Públicas sobre Cambio Climático*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Santiago, Naciones Unidas. www.cepal.org/sites/default/files/news/files/sintesispp_cc_adaptacion_al_cambio_climatico_en_alac.pdf.
- Schmitz, T. 2020. Investing in ecosystems for water security: The case of the Kenya water towers. R. C. Brears (ed.), *The Palgrave Handbook of Climate Resilient Societies*. Cham, Suiza, Palgrave Macmillan. doi.org/10.1007/978-3-030-32811-5_23-1.
- Schoolmeester, T., Johansen, K. S., Alfthan, B., Baker, E., Hespings, M. y Verbist, K. 2018. *The Andean Glacier and Water Atlas – The Impact of Glacier Retreat on Water Resources*. París/Arendal, Noruega, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO)/GRID-Arendal. unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000265810.

- Secretaría Permanente del Convenio de los Alpes. 2009a. *Water and Water Management Issues: Report on the State of the Alps*. Alpine Convention: Alpine Signals - Special Edition 2. Summary. Innsbruck, Austria/Bolzano, Italia. Secretaría Permanente del Convenio de los Alpes. www.alpconv.org/fileadmin/user_upload/Publications/RSA/RSA2_summary_EN.pdf.
- . 2009b. *Water and Water Management Issues: Report on the State of the Alps*. Alpine Convention: Alpine Signals - Special Edition 2. Innsbruck, Austria/Bolzano, Italia. Secretaría Permanente del Convenio de los Alpes. www.alpconv.org/fileadmin/user_upload/Publications/RSA/RSA2_long_EN.pdf.
- . 2019. *Natural Hazard Risk Governance: Report on the State of the Alps*. Alpine Convention: Alpine Signals - Special Edition 7. Innsbruck, Austria/Bolzano, Italia. Secretaría Permanente del Convenio de los Alpes. www.alpconv.org/fileadmin/user_upload/Publications/RSA/RSA7_EN.pdf.
- . 2022. *Multi-annual Work Programme of the Alpine Conference 2023–2030*. Innsbruck, Austria/Bolzano, Italia. Secretaría Permanente del Convenio de los Alpes. www.alpconv.org/fileadmin/user_upload/Organisation/AC/XVII/AC_MAP_2023-2030_en_web.pdf.
- Shaban, A. 2020. Snow cover. *Water Resources of Lebanon*. World Water Resources. Vol. 7. Cham, Suiza, Springer. doi.org/10.1007/978-3-030-48717-1_5.
- Shaban, A., Faour, G., Khawlie, M. y Abdallah, C. 2004. Remote sensing application to estimate the volume of water in the form of snow on Mount Lebanon. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 49, No. 4, pp. 643-653. doi.org/10.1623/hysj.49.4.643.54432.
- Shikuku, K. M., Winowiecki, L., Twyman, J., Eitzinger, A., Pérez, J. G., Mwangera, C. y Läderach, P. 2017. Smallholder farmers' attitudes and determinants of adaptation to climate risks in East Africa. *Climate Risk Management*, Vol. 16, pp. 234-245. doi.org/10.1016/j.crm.2017.03.001.
- Shrestha, F. 2023. Glacial Lake Outburst Floods in High Mountain Asia Documented in Regional Effort. Sitio web del Centro Internacional para la Ordenación Integrada de las Montañas (ICIMOD), 15 de diciembre de 2023. www.icimod.org/media-advisory/glacial-lake-outburst-floods-in-high-mountain-asia-documented-in-regional-effort/.
- Shumilova, O., Tockner, K., Sukhodolov, A., Khilchevskiy, V., De Meester, L., Stepanenko, S., Trokhymenko, G., Hernández-Agüero, J. A. y Gleick, P. 2023. Impact of the Russia–Ukraine armed conflict on water resources and water infrastructure. *Nature Sustainability*, Vol. 6, pp. 578-586. doi.org/10.1038/s41893-023-01068-x.
- Singh Shrestha, M. y Sherchan, U. 2018. Communicating Flood Early Warning in the Ratu Watershed. Sitio web del Centro Internacional para la Ordenación Integrada de las Montañas (ICIMOD), 30 de julio de 2018. www.icimod.org/communicating-flood-early-warning-in-the-ratu-watershed/.
- Sorg, A., Bolch, T., Stoffel, M., Solomina, O. y Beniston, M. 2012. Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia). *Nature Climate Change*, Vol. 2, pp. 725-731. doi.org/10.1038/nclimate1592.
- Stecher, G., Hohensinner, S. y Herrnegger, M. 2023. Changes in the water retention of mountainous landscapes since the 1820s in the Austrian Alps. *Frontiers in Environmental Science*, Vol. 11. doi.org/10.3389/fenvs.2023.1219030.
- Sturm, M., Taras, B., Liston, G. E., Derksen, C., Jonas, T. y Lea, J. 2010. Estimating snow water equivalent using snow depth data and climate classes. *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 11, No. 6, pp. 1380-1394. doi.org/10.1175/2010JHM1202.1.
- Takase, M., Kipkoeh, R. y Essandoh, P. K. 2021. A comprehensive review of energy scenario and sustainable energy in Kenya. *Fuel Communications*, Vol. 7, Artículo 100015. doi.org/10.1016/j.jfueco.2021.100015.
- Taylor, R. G., Mileham, L., Tindimugaya, C. y Mwebembezi, L. 2009. Recent glacial recession and its impact on alpine riverflow in the Rwenzori Mountains of Uganda. *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 55, No. 3-4, pp. 205-213. doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2009.04.008.
- Taylor, S. J., Ferguson, J. W. H., Engelbrecht, F. A., Clark, V. R., Van Rensburg, S. y Barker, N. 2016. The Drakensberg Escarpment as the great supplier of water to South Africa. *Developments in Earth Surface Processes*, Vol. 21, pp. 1-46. doi.org/10.1016/B978-0-444-63787-1.00001-9.
- Torres, M. C., Naranjo, E., Fierro, V. y Carchipulla-Morales, D. 2023. Social technology for the protection of the *Páramo* in the central Andes of Ecuador. *Mountain Research and Development*, Vol. 43, No. 4, pp. D1-D11. doi.org/10.1659/mrd.2022.00022.
- Travers, J. 2023. Covering Glaciers with Blankets to Hide the Ice – and the Real Problem. Sitio web de la Columbia Climate School, 13 de enero de 2023. news.climate.columbia.edu/2023/01/13/covering-glaciers-with-blankets-to-hide-the-ice-and-the-real-problem/.
- Trisos, C. H., Adelekan, I. O., Totin, E., Ayanlade, A., Efitre, J., Gameda, A., Kalaba, K., Lennard, C., Masao, C., Mgaya, Y., Ngaruiya, G., Olago, D., Simpson, N. P. y Zakieldeen, S. 2022. Africa. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem y B. Rama (eds), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribución del Grupo de Trabajo II al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge, Reino Unido/Nueva York, Cambridge University Press, pp. 1285-1455. doi.org/10.1017/9781009325844.011.
- Umrirbekov, A., Peña-Guerrero, M. D. y Müller, D. 2022. Regionalization of climate teleconnections across Central Asian mountains improves the predictability of seasonal precipitation. *Environmental Research Letters*, Vol. 17, No. 5, Artículo 055002. doi.org/10.1088/1748-9326/ac6229.
- UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura). 2022. *Improving Knowledge of Central Asian Glaciers and their Resilience to Climate Change*. ATA-2022/PI/2. UNESCO. unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000382818.
- . 2024. Institutos y centros de categoría 2, Exámenes, renovaciones y ceses de actividades, Parte I, Centro Regional de Glaciología en Asia Central (Kazajstán). Decimonovena sesión del Consejo Ejecutivo. París, UNESCO. unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000388450_spa.
- . s.f. Central Asian Regional Glaciological Centre. Sitio web del CARGC. cargc.org/en/.
- UNESCO/UICN (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura/Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y de los Recursos Naturales). 2022. *World Heritage Glaciers: Sentinels of Climate Change*. París/Gland, Suiza, UNESCO/UICN. unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000383551.
- Valdivia Araica, A., Navarro, C. y Hernández, M. 2023. Climate Services: A Strategy for Increasing Resilience in Guatemala's Dry Corridor. Sitio web de Alliance Biodiversity & CIAT, 3 de septiembre de 2023. alliancebiodiversityciat.org/stories/stories/climate-services-strategy-to-increase-resilience-corridor-dry-guatemala.
- Van der Graaf, L. y Siarova, H. 2021. Multifaceted Threats to Biodiversity in Central Asia. Sitio web del Global Waste Cleaning Network, 25 de septiembre de 2021. gwcweb.org/2021/09/25/multifaceted-threats-to-biodiversity-in-central-asia/.
- Veettil, B. K. y Kamp, U. 2019. Global disappearance of tropical mountain glaciers: Observations, causes, and challenges. *Geosciences*, Vol. 9, No. 5, p. 196. doi.org/10.3390/geosciences9050196.
- Viviroli, D. y Weingartner, R. 2004. The hydrological significance of mountains: From regional to global scale. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 8, No. 6, pp. 1017-1030. doi.org/10.5194/hess-8-1017-2004.
- Viviroli, D., Dürr, H. H., Messerli, B., Meybeck, M. y Weingartner, R. 2007. Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance. *Water Resources Research*, Vol. 43, No. 7. doi.org/10.1029/2006WR005653.

- Vivioli, D., Kummu, M., Meybeck, M., Kallio, M. y Wada, Y. 2020. Increasing dependence of lowland populations on mountain water resources. *Nature Sustainability*, Vol. 3, pp. 917-928. doi.org/10.1038/s41893-020-0559-9.
- Wamucii, C. N., van Oel, P. R., Ligtenberg, A., Gathenya, J. M. y Teuling, A. J. 2021. Land use and climate change effects on water yield from East African forested water towers. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 25, No. 11, pp. 5641-5665. doi.org/10.5194/hess-25-5641-2021.
- Wester, P., Mishra, A., Mukherji, A. y Shrestha, A. B. (eds). 2019. *The Hindu Kush Himalaya Assessment: Mountains, Climate Change, Sustainability and People*. Cham, Suiza, Springer. lib.icimod.org/record/34383.
- WGMS (Servicio Mundial de Vigilancia de los Glaciares). 2024. *Fluctuations of Glaciers Database*. Zúrich, Suiza, WGMS. doi.org/10.5904/wgms-fog-2024-01.
- Wymann von Dach, S., Romeo, R., Vita, A., Wurzing, M. y Kohler, T. (eds). 2014. *La Agricultura de Montaña es Agricultura Familiar: Una Contribución de las Zonas de Montaña al Año Internacional de la Agricultura Familiar 2014*. Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)/Centro para el Desarrollo y el Medio Ambiente (CDE)/BOKU. www.fao.org/3/a-i3480s.pdf.
- Zandi, M. 2023. *Central Asia's Clean Energy Opportunity: Hydropower*. Sitio web del Atlantic Council, 2 de junio de 2023. www.atlanticcouncil.org/blogs/energysource/central-asias-clean-energy-opportunity-hydropower/.
- Zhang, Y., Kang, S., Sprenger, M., Cong, Z., Gao, T., Li, C., Tao, S., Li, X., Zhong, X., Xu, M., Meng, W., Neupane, B., Qin, X. y Sillanpää, M. 2018. Black carbon and mineral dust in snow cover on the Tibetan Plateau. *Cryosphere*, Vol. 12, pp. 413-431. doi.org/10.5194/tc-12-413-2018.
- Zhang, Y., Gao, T., Kang, S., Sprenger, M., Tao, S., Du, W., Yang, J., Wang, F. y Meng, W. 2020. Effects of black carbon and mineral dust on glacial melting on the Muz Taw glacier, Central Asia. *Science of The Total Environment*, Vol. 740, Artículo 140056. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140056.
- Zheng, L., Gaire, N. P. y Shi, P. 2021. High-altitude tree growth responses to climate change across the Hindu Kush Himalaya. *Journal of Plant Ecology*, Vol. 14, No. 5, pp. 829-842. doi.org/10.1093/jpe/rtab035.
- Zoi Environment Network. 2022. *Mountains of Central Asia: Supporting Biodiversity Safeguards in the Era of an Infrastructure Boom in Kyrgyzstan, Kazakhstan, and Uzbekistan*. IMPACT Report. CEPF-Zoi Project, 2021-2022. zoinet.org/wp-content/uploads/2022/06/CEPF-impact-2022-en.pdf.

Capítulo 8

Desarrollo de conocimientos y capacidades

UNESCO-PHI*

Zoë Johnson, Chris DeBeer, Corinne Schuster-Wallace y John Pomeroy¹, Sher Muhammad², Fred Wrona y Kerry Black³, Dhiraj Pradhananga⁴ y James McPhee^{5,6}

Con contribuciones de: Anil Mishra y Abou Amani (UNESCO-PHI), Stefan Uhlenbrook (OMM) y Tenzing Sherpa (ICIMOD)

*UNESCO-PHI coordinó la elaboración del capítulo con la participación de

¹ Universidad de Saskatchewan, ² ICIMOD, ³ Universidad de Calgary, ⁴ Universidad Tribhuvan, ⁵ Universidad de Chile y ⁶ Asociación Internacional de Ciencias Hidrológicas

8.1 Brechas de datos y conocimientos sobre alta montaña

● ● ●
Es necesario comprender mejor las características hidrológicas de las regiones de alta montaña para respaldar los procesos de toma de decisiones

Es necesario comprender mejor las características hidrológicas de las regiones de alta montaña para respaldar los procesos de toma de decisiones. Se requieren políticas prioritarias para: reducir las deficiencias en la recopilación de datos hidrometeorológicos en las regiones montañosas; desarrollar modelos integrados con base física que tengan en cuenta las interconexiones entre atmósfera, criosfera, hidrología, ecología y seres humanos; ampliar los programas de capacitación para permitir la integración de diferentes tipos de conocimiento (por ejemplo, datos biofísicos, datos socioeconómicos y conocimiento indígena y local); y facilitar la participación de los pueblos indígenas, las comunidades locales y las mujeres en los procesos de recopilación de conocimientos.

8.1.1 Datos y modelos para la adaptación y la gestión de riesgos

La alta variabilidad del clima, la topografía, la geología y la vegetación de montaña, factores que influyen en el movimiento del agua a través del territorio, crea una necesidad excepcional de redes hidrometeorológicas representativas y sistemas de información robustos. Esta alta variabilidad también contribuye a la incertidumbre en los datos hidrometeorológicos relacionados con la montaña: las condiciones en los fondos de los valles pueden ser muy diferentes a las de las cimas de las montañas, a pesar de las pequeñas distancias horizontales entre ellos.

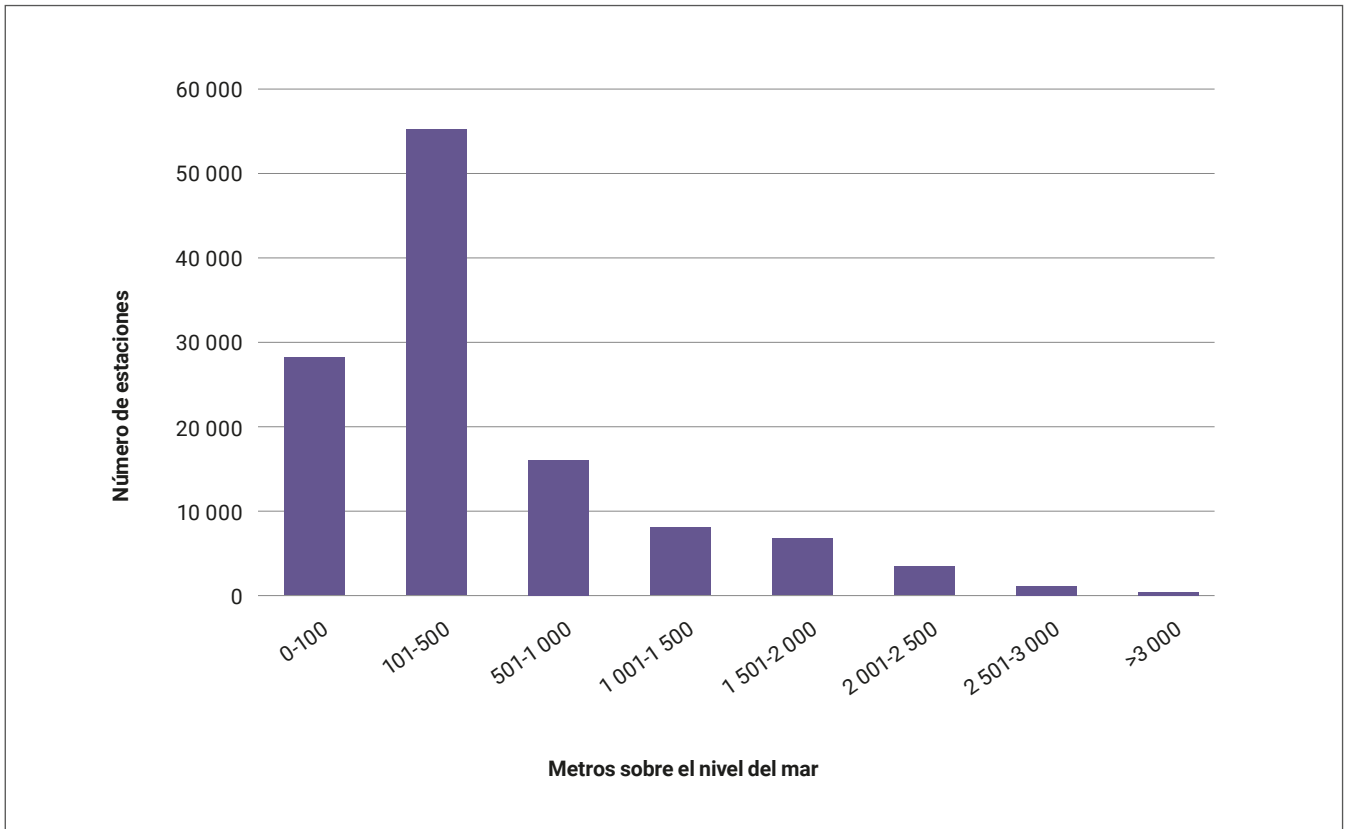
Las observaciones y predicciones hidrometeorológicas en zonas de alta montaña son inciertas debido a la escasez de redes de monitoreo y a la baja resolución de los modelos. Los regímenes naturales de nieve y hielo en las montañas dependen de la precipitación y la termodinámica, y se ven afectados por fuertes gradientes altitudinales. Como resultado, los modelos climáticos y meteorológicos de escalas muy reducidas ofrecen predicciones hidrometeorológicas deficientes a escalas inferiores a unos pocos kilómetros. Estos modelos deben ser capaces de analizar la convección, los procesos de precipitación orográfica y las fases de precipitación para mejorar su precisión (Karki et al., 2017).

Los modelos hidrológicos deben operar a escalas de hasta unos pocos cientos de metros y considerar la complejidad de la circulación de los flujos de viento cerca del terreno y la orientación de las pendientes para determinar los patrones de redistribución de la nieve y ablación del hielo (Pradhananga y Pomeroy, 2022). Las predicciones de los modelos pueden beneficiarse de la corrección de sesgos y la asimilación de datos, lo que hace que las observaciones *in situ* sean cruciales para mejorar la comprensión de las interacciones entre el clima y la criosfera. Sin embargo, realizar estas observaciones en regiones montañosas es difícil, ya que las montañas suelen ser altas, escarpadas y remotas, y presentan considerables peligros y amenazas para la seguridad humana (IPCC, 2019).

La región del Hindu Kush Himalaya (HKH) ejemplifica este desafío: solo el balance de masa de 28 de más de 50 000 glaciares se mide activamente (ICIMOD, 2023). Los glaciares de referencia con respecto al balance de masa se han seleccionado generalmente con base en criterios como la accesibilidad, la seguridad y la simplicidad geométrica (Østrem, 2006), lo cual podría no representar plenamente la diversidad de los glaciares en el contexto regional más amplio. Las observaciones relativas a la capa de nieve, el clima y los caudales de las montañas también están sesgadas hacia las elevaciones bajas, ya que son más accesibles.

El sesgo de baja altitud (figura 8.1) es sumamente problemático dada la fuerte influencia de la altitud en las condiciones hidrometeorológicas, y ha dejado a las altas montañas prácticamente sin monitoreo en muchas regiones (Grupo de Trabajo EDW de la MRI, 2015). Los cursos de nieve y los colchones de nieve se ubican predominantemente en claros forestales a elevaciones medias. Incluso los pocos que se encuentran a gran altitud suelen ubicarse en terrenos relativamente planos, lo que impide determinar la variabilidad de la redistribución de la nieve y la dinámica de ablación en las montañas (Bales et al., 2006).

Figura 8.1 Distribución histórica global de estaciones hidrometeorológicas por elevación, 1750-2024



Nota: no todas estas estaciones están activas actualmente. Las altas montañas (regiones montañosas donde la nieve y el hielo desempeñan un papel importante en el abastecimiento global de agua dulce y el ciclo hidrológico local o regional) varían en altitud, pero la mayoría se encuentra al menos a 2 000 metros sobre el nivel del mar (m s.n.m.) y algunas superan los 6 000 m s.n.m.

Fuente: basado en datos de NCEI NOAA (s.f.).

Los límites en el monitoreo de la criosfera en las regiones montañosas exagera la incertidumbre en las predicciones hidroglaciológicas, aumentando el riesgo de mala gestión de los recursos hídricos. La escasez de datos históricos dificulta la capacidad de calcular el riesgo y examinar los cambios a lo largo del tiempo. La falta de datos también lleva a la aceptación de modelos de baja resolución, enfoques de modelización excesivamente simplificados y una representación inadecuada de la dinámica hidrometeorológica. Idealmente, las redes de medición hidrometeorológica, hidrométrica y de balance de masa de los glaciares se coordinarían y ampliarían. Además de las barreras financieras, logísticas y de acceso, existe la limitación práctica de que, a medida que un glaciar se desintegra, se vuelve más difícil medirlo de manera consistente, lo que hace que la ampliación de las redes de vigilancia se haga más difícil también.

● ● ●
A medida que un glaciar se desintegra, se vuelve más difícil medirlo de manera consistente, lo que hace que la ampliación de las redes de vigilancia se haga más difícil también

Las técnicas de teledetección, como el LiDAR aerotransportado y la altimetría satelital, pueden proporcionar información valiosa. Sin embargo, requieren observaciones *in situ* para su validación y calibración. Existe una gran necesidad de un sistema satelital con alta resolución capaz de medir el equivalente en agua de nieve (EAN) en montañas; en terrenos complejos, los satélites actuales pueden estimar la superficie cubierta de nieve, pero no el EAN.

Reducir estas brechas de datos es esencial para disminuir la incertidumbre y mitigar los riesgos. Los sistemas de alerta temprana y otras intervenciones de mitigación suelen depender en gran medida de tecnología desplegada sobre el terreno. La predicción de sequías e inundaciones, el funcionamiento óptimo de presas y aliviaderos, así como el despliegue de redes de detritos, presas secas y zanjas para mitigar los flujos de detritos, dependen de un conocimiento sólido de los sistemas físicos subyacentes.

Para comprender los cambios criosféricos y mejorar la sostenibilidad de los enfoques de mitigación y adaptación, es necesario ampliar la infraestructura de observación en zonas de alta montaña y, fundamentalmente, hacer que los datos sean de libre acceso. Incrementar las observaciones requiere realizar mediciones periódicas y a escala más amplia del balance de masa glaciar y transectos para determinar el EAN, monitorear las condiciones térmicas y de humedad del suelo congelado, establecer más estaciones meteorológicas a gran altitud para el monitoreo constante de variables como la precipitación sólida, la temperatura y la profundidad de la nieve, y establecer más pozos hidrométricos y de monitoreo de aguas subterráneas a gran altitud, así como estaciones para controlar el nivel de los lagos en alta montaña.

También se necesita la capacitación y el despliegue de técnicos de campo en montaña capaces de realizar estudios sobre glaciares, nieve y aspectos hidrométricos, mantener equipos automatizados y procesar datos para obtener resultados prácticos. A medida que se explora la ciencia ciudadana como una opción para aumentar la recopilación de datos (sección 8.3.2), otros requisitos pueden incluir la necesidad de desarrollar métodos validados y estandarizados adaptados a las capacidades públicas, así como una mayor capacidad para mantener mecanismos de supervisión de los sistemas de recopilación de datos.

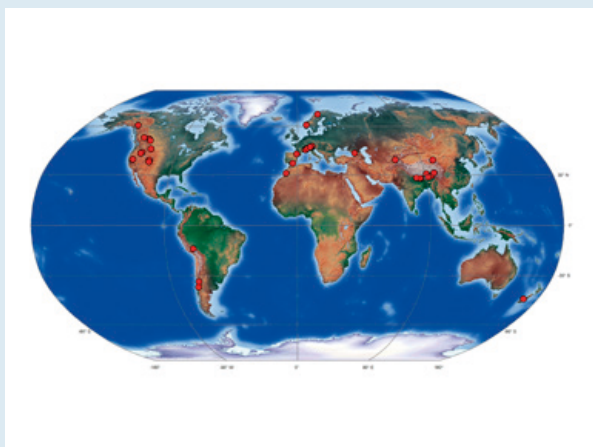
Una vez recopilados los datos, su uso requiere mayor capacidad humana, técnica y financiera en sistemas de gestión de datos (sección 8.4). Disponer de datos abiertos y de libre acceso, así como de sistemas integrados de observación, predicción y servicios para las cuencas de montaña, puede ser fundamental para facilitar la usabilidad de la información (Adler et al., 2019), y es un área en la que las políticas nacionales pueden contribuir. La financiación para mantener lo anterior es necesaria, aunque no constituye un obstáculo intrínseco para las redes de investigación colaborativa (como se ejemplifica en el cuadro 8.1).

La colaboración internacional ha sido esencial para facilitar la investigación sobre la criosfera. Por ejemplo, la Asociación Internacional de Ciencias Criosféricas, a través del Programa Hidrológico Intergubernamental de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, desarrolló el *Glossary of Glacier Mass Balance and Related Terms (Glosario de Balance de Masa Glaciar y Términos Relacionados)*; Cogley et al., 2011) para ayudar a estandarizar la recopilación de datos de balance de masa, y la *International Classification for Seasonal Snow on the Ground (Clasificación Internacional de la Nieve Estacional sobre el Terreno)*; Fierz et al., 2009). Sistemas de clasificación estandarizados como estos son importantes para mantener la cohesión en las prácticas científicas internacionales y son esenciales para realizar análisis globales.

Cuadro 8.1 Red Internacional para la Hidrología de Cuencas Alpinas de Investigación (INARCH)

El Red Internacional para la Hidrología de Cuencas Alpinas de Investigación es un proyecto transversal del Panel de Hidroclimatología sobre Intercambios Globales de Energía y Agua del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (WCRP)^a. Su objetivo es: i) medir y comprender los procesos atmosféricos, hidrológicos, criosféricos, biológicos y de interacción entre el ser humano y el agua en alta montaña; ii) mejorar la predicción de dichos procesos considerándolos como sistemas acoplados; y iii) diagnosticar su sensibilidad al cambio climático y proponer cómo se pueden gestionar para promover la sostenibilidad del agua en el marco de los cambios globales (Pomeroy et al., 2015).

La red cuenta con 56 científicos y 38 cuencas de investigación bien instrumentadas en 18 países y 6 continentes, y desde 2015 opera sin financiación central. En su lugar, INARCH aprovecha otras actividades para alcanzar objetivos colectivos, con una filosofía y un compromiso finalizados a la obtención de datos abiertos, y realiza importantes esfuerzos para recopilarlos y publicarlos (Pomeroy y Marks, 2024). Su éxito se debe al entusiasmo y la dedicación de los investigadores, que mantienen una participación activa mediante talleres anuales organizados en zonas de alta montaña cerca de las cuencas de investigación y trabajan en colaboración en iniciativas como el experimento de período de observación común de INARCH (2022-2024). Los resultados científicos del INARCH han respaldado la Cumbre sobre las Regiones de Alta Montaña de la Organización Meteorológica Mundial y el Año Internacional de la Conservación de los Glaciares de las Naciones Unidas 2025.



Ubicación de las cuencas de investigación del INARCH en regiones montañosas de todo el mundo

Fuente: autores.



Ejemplo de una estación hidrometeorológica automatizada INARCH desplegada en una cuenca de alta montaña: Montañas Qilian, China

Fotografía: John Pomeroy.

^a Para obtener más información, consulte inarch.usask.ca/.

• • •
**Disponer de datos
abiertos y de
libre acceso para
las cuencas de
montaña puede
ser fundamental
para facilitar la
usabilidad de la
información**

Numerosos organismos de los sectores público y privado participan en la investigación y el monitoreo de la criosfera de montaña, a nivel nacional, regional e internacional. Las redes de investigación colaborativa pueden ser una herramienta poderosa y viable para superar las brechas de conocimiento y evitar redundancias en la investigación o la asignación de recursos. Las cordilleras y cuencas montañosas suelen ser transfronterizas y rara vez se consideran una unidad de gestión única. Las instituciones individuales a menudo carecen de la capacidad o el mandato para realizar el monitoreo, la modelización y la evaluación de las zonas montañosas. Por ello, el desarrollo de sistemas integrados de observación, predicción y servicios en las cuencas montañosas constituye un valioso medio para superar las deficiencias de capacidad y recursos.

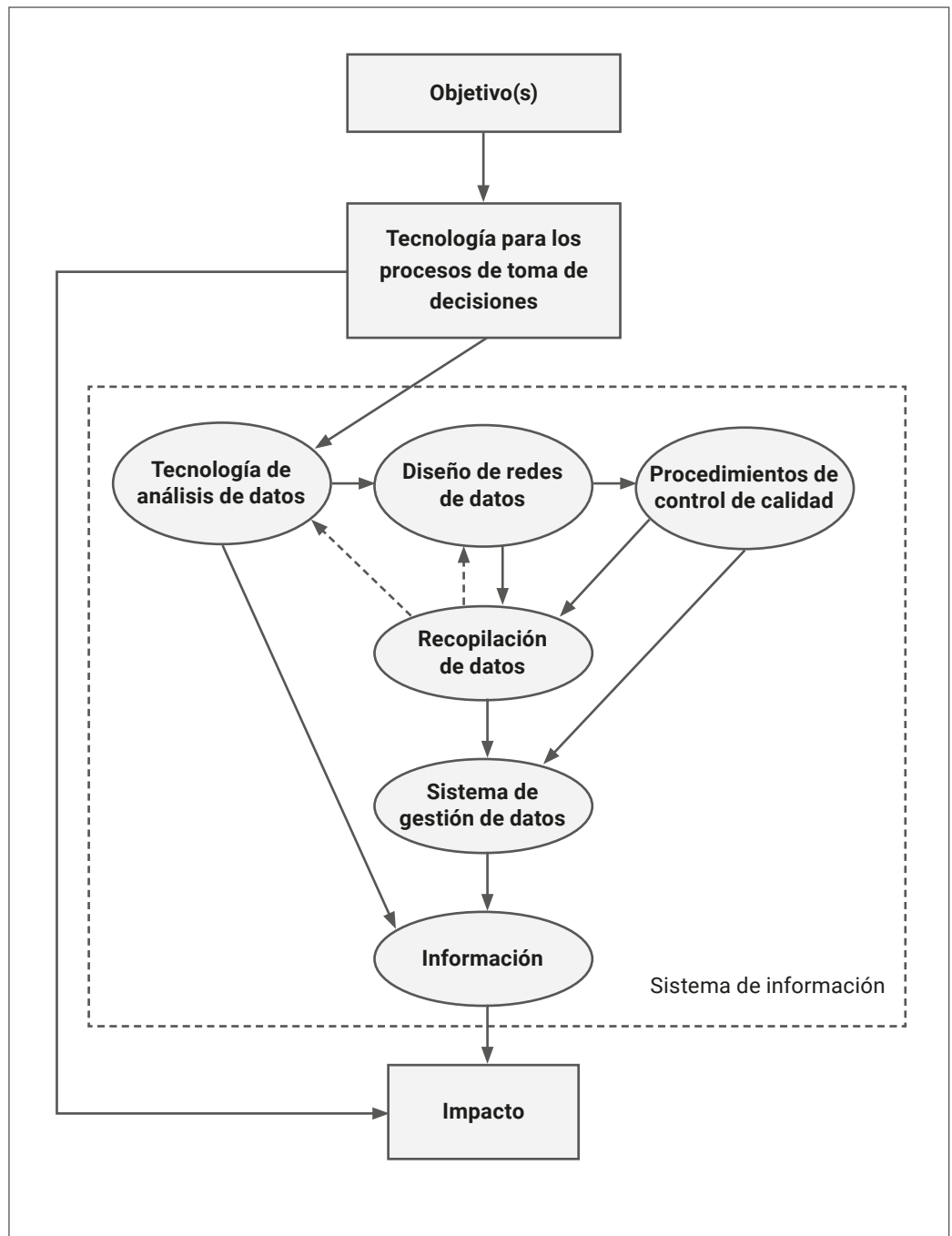
Los modelos hidroglaciológicos mejorados pueden subsanar algunas deficiencias de datos. Son necesarios para mejorar la predicción de los cambios criosféricos e hidrológicos en las regiones montañosas. La acumulación y el derretimiento de la nieve y los glaciares estacionales se ven influenciados por procesos que varían según el lugar, sensibles a las perturbaciones climáticas y que cambian rápidamente (véase el capítulo 2), y que, sin embargo, no están bien representados en la mayoría de los modelos (Pomeroy et al., 2022).

Es imperativo que los modelos predictivos para las montañas se basen en leyes físicas apropiadas y no dependan de enfoques empíricos, basados en datos o simplificados (por ejemplo, modelos de índices de temperatura y fusión). Esto se debe a la compleja termodinámica de la criosfera montañosa y a la escasez de observaciones disponibles para calibración. A medida que aumenta la capacidad computacional y la comprensión de la ecohidrología y la sociohidrología, estos modelos hidroglaciológicos deben complementarse con modelos de sistemas ecológicos y sociales, así como con la asimilación de datos. Esto les permitirá predecir no solo las tendencias del sistema hidrológico, sino también los posibles impactos en las personas, las sociedades, las economías y los ecosistemas, así como examinar las retroalimentaciones y los cambios transitorios, y anticipar los compromisos y las consecuencias imprevistas de las soluciones de adaptación.

El desarrollo de sistemas integrados de información sobre las zonas de montaña es demandante. La figura 8.2 identifica los componentes básicos de un sistema de información hidrológica, pero también se requieren aportaciones acerca de aspectos hidrometeorológicos, ecológicos y socioeconómicos para incluso determinar los objetivos iniciales (OMM, 2020). La identificación de necesidades puede beneficiarse enormemente de las redes interdisciplinarias transversales, no solo entre miembros de la comunidad científica expertos en diferentes disciplinas, sino también con representantes de diversas dimensiones culturales, sociales, económicas y políticas de la sociedad. Para diseñar una investigación interdisciplinaria adecuada que aborde las necesidades en tiempo real, es importante una combinación intersectorial de aportaciones, ya que pueden ayudar a identificar quiénes son los actores clave (por ejemplo, comunidades afectadas, expertos en la materia y organizaciones existentes con mandatos similares), qué marcos políticos y regulatorios deben considerarse (por ejemplo, acuerdos para compartir aguas transfronterizas), las necesidades de investigación coincidentes sobre el tema y las oportunidades de sinergias colaborativas.

La sobrecarga de información se reconoce generalmente como un problema en la investigación y la formulación de políticas. Se puede minimizar significativamente reuniendo a las personas para conversar e identificar direcciones clave, recursos y consideraciones científicas. Los beneficios de la colaboración interdisciplinaria e interregional son innegables. En el caso de las regiones de alta montaña, dicha colaboración es necesaria para abarcar la amplitud de los componentes de los sistemas hídricos: atmosféricos, hidrológicos, glaciológicos, ecológicos y humanos.

Figura 8.2
Componentes de un sistema
de información hidrológica



Fuente: OMM (2020, fig. I.2.2, p. I.2-4).

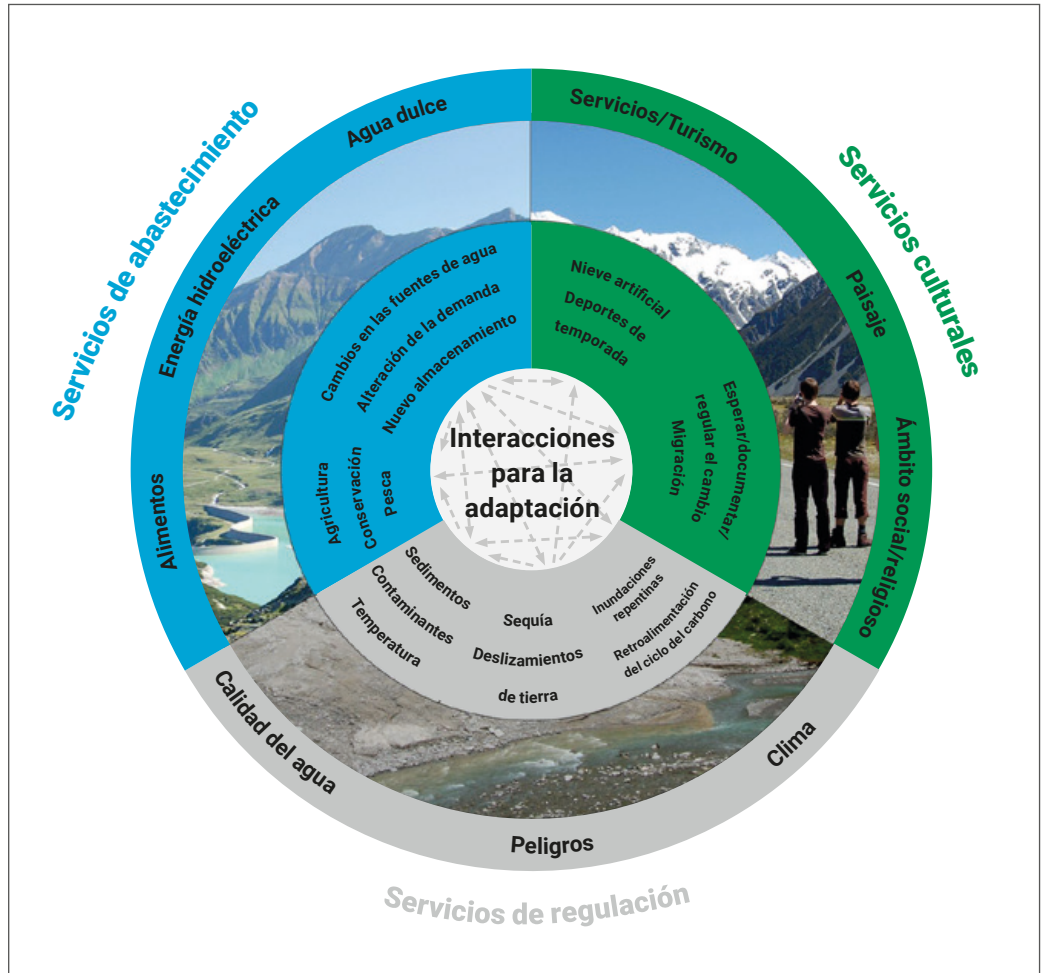
8.1.2 Brechas de datos ecológicos y ambientales

Los impactos de las condiciones cambiantes de la criosfera en los sistemas ecológicos no se conocen por completo (véase el capítulo 6). Las consideraciones ambientales suelen enmarcarse desde la perspectiva de los servicios ecosistémicos, es decir, los beneficios que los sistemas naturales proporcionan a los seres humanos de forma gratuita y que, de otro modo, tendrían que ser generados o creados, como el suministro de agua potable (Mengist et al., 2020). Los impactos de los ecosistemas merecen un reconocimiento por sí mismos: el valor de un ecosistema no se deriva intrínsecamente del uso que los seres humanos hacen de él. Al prepararse para condiciones ambientales cambiantes, es necesario reconocer explícitamente cómo los seres humanos se benefician actualmente (y quizás inconscientemente) de diversos procesos ecológicos de montaña, lo que orienta las políticas y permite identificar a las poblaciones vulnerables.

Milner et al. (2017) destacaron la importancia de mejorar la capacidad de predecir el momento, la magnitud y la duración del derretimiento de la criosfera de montaña para orientar las acciones necesarias para promover una variedad de servicios ecosistémicos socioeconómicos, como los servicios culturales, de abastecimiento y regulación (figura 8.3).

Figura 8.3

Marco conceptual que integra los efectos de la contracción de la criosfera en los aspectos culturales, de abastecimiento y regulación de los servicios ecosistémicos



Fuente: Milner et al. (2017, fig. 3, p. 9775). La licencia Attribution-ShareAlike 3.0 IGO (CC BY-SA 3.0 IGO) no se aplica a esta figura. PNAS no es responsable de la exactitud de esta traducción.

Existen pocos proyectos de investigación a largo plazo sobre las conexiones entre los ecosistemas terrestres, acuáticos y marinos. Se requieren estudios integrados adicionales que aborden los vínculos de las comunidades con los ecosistemas alpinos y su adaptación al cambio. Las áreas prioritarias incluyen la comprensión de los impactos de la degradación de la criosfera en la calidad del agua, la distribución y productividad de las especies terrestres y acuáticas, la producción agrícola local, los hábitats de la fauna silvestre con respecto a la subsistencia y sus respectivas relaciones con la seguridad hídrica, alimentaria y sanitaria. Por ejemplo, la preocupación por la productividad de las plantas medicinales y la sostenibilidad de los medios de vida basados en el pastoreo es pronunciada en la región del Hindu Kush Himalaya, ya que la sensibilidad de los entornos alpinos y las opciones frecuentemente limitadas de adaptación en entornos tan extremos han forzado la migración en algunas circunstancias (ICIMOD, 2023). La colaboración con las comunidades de alta montaña es vital en este sentido para mapear las interdependencias y vulnerabilidades de los ecosistemas.

Dado que se desconocen todas las implicaciones de los cambios de la criosfera en las regiones montañosas, el riesgo de sobrepasar los umbrales de sostenibilidad ecológica y socioeconómica es alto (IPCC, 2019). Se necesitan soluciones de mitigación y adaptación, aunque no siempre sean realizables. También es posible que se requieran cambios fundamentales en las relaciones entre los seres humanos y el medio ambiente. Por ejemplo, la desaparición de arroyos alimentados por la nieve y los glaciares ha obligado a una comunidad nepalí a reubicar toda su aldea, ya que desapareció el agua necesaria para sostener la producción agrícola y el ganado (Rauniyar, 2024). En estas circunstancias, no fue posible implementar medidas de adaptación y mitigación moderadas; la única “solución” verdadera fue cambiar fundamentalmente la relación de los aldeanos con el entorno circundante. Se necesitan evaluaciones totalmente integradas de los impactos en los ecosistemas para comprender mejor dichos vínculos y vulnerabilidades, así como los impactos a corto y largo plazo en la salud humana, el tejido social, los cultivos y los medios de vida.

8.2 Aportaciones del conocimiento indígena, de género y local

El compromiso y la colaboración significativa con los pueblos indígenas y las comunidades locales, con su consentimiento informado previo y la voluntad de aprender de formas de gestión de los sistemas hídricos que se han forjado a lo largo de generaciones, mejorarán la capacidad colectiva para responder a los cambios de la criosfera de montaña y de las condiciones hidrológicas de los valles. Tradicionalmente las mujeres han sido marginadas en el ámbito de las consultas sobre la gestión del agua; de la misma manera, los pueblos indígenas y las comunidades locales de las regiones montañosas se encuentran entre las categorías más afectadas y, sin embargo, desproporcionadamente ignoradas en lo que respecta a la participación política y la asignación de recursos (Latchmore et al., 2018). Si bien los pueblos indígenas y las comunidades locales representan el 6 % de la población mundial, constituyen el 15 % de las poblaciones más pobres del mundo y se ven desproporcionadamente afectados por los fenómenos climáticos y los impactos en el agua relacionados (Tsosie, 2007; Amnistía Internacional, s.f.; Naciones Unidas, s.f.).

● ● ● *Tradicionalmente las mujeres han sido marginadas en el ámbito de las consultas sobre la gestión del agua*

En las regiones montañosas, los pueblos indígenas y las comunidades locales mantienen vínculos históricos con la tierra y el agua, profundamente arraigados en sus prácticas culturales, espirituales y de subsistencia. Estos vínculos se caracterizan por una profunda comprensión y respeto por el entorno natural, donde los sistemas de conocimiento tradicional se han desarrollado a lo largo de generaciones para gestionar y sustentar los ecosistemas. Por ejemplo, en los Andes, las terrazas agrícolas y los sistemas de gestión del agua de los pueblos quechua y aymara dan testimonio de su sofisticada capacidad de adaptación a entornos de gran altitud. De igual manera, en el Himalaya, pueblos indígenas y locales como los sherpas y los ladakhis mantienen una estrecha relación con sus tierras montañosas, donde las prácticas espirituales y los medios de vida cotidianos están estrechamente vinculados al paisaje.

Esta interconexión subraya el papel crucial que las estrategias de gestión indígenas —especialmente las de las mujeres indígenas, quienes a menudo son protectoras del agua— desempeñan en la preservación de los ecosistemas montañosos y el uso sostenible de los recursos (Kelkar y Tshering, 2002; Cave y McKay, 2016). La importancia cultural y espiritual de estas regiones a menudo trasciende los usos prácticos, abarcando una visión holística del mundo que considera la tierra y el agua como parte integral de la identidad y el bienestar.

Los pueblos indígenas y las comunidades locales de las regiones montañosas mantienen vínculos estrechos con la tierra, los cuales pueden, y deben, destacarse para lograr el desarrollo sostenible. Si bien todos los pueblos indígenas y las comunidades locales son diferentes, la interconectividad entre el agua, la tierra y los seres humanos es un pilar

fundamental de muchas de sus visiones del mundo, a diferencia de la ciencia occidental, que suele considerarlos en términos de recursos naturales, activos biofísicos o productos básicos, a menudo de forma segregada. La ausencia de una visión holística del mundo en la ciencia occidental se opone fundamentalmente a las relaciones de los pueblos indígenas y las comunidades locales con el medio ambiente natural. Este es un ámbito en el que las formas de conocimiento occidentales pueden enriquecerse gracias a los pueblos indígenas y las comunidades locales, especialmente dada la necesidad de enfoques más holísticos para lograr un desarrollo sostenible y equitativo.

La Plataforma Intergubernamental Científico-Normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas (IPBES) evaluó la diversidad de las visiones del mundo y los sistemas de valores (IPBES, 2022). Además, el capítulo 6 de la edición de 2024 del *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos* ofreció un ejemplo de las implicaciones de dichas visiones para el agua (Naciones Unidas, 2024). Estos enfoques contrastan con los marcos occidentales, que a menudo han generado metas u objetivos de política que no se ajustan a las necesidades y valores de las comunidades locales, por ejemplo, al priorizar uno o dos indicadores representativos según las necesidades económicas, energéticas o urbanas de las áreas aguas abajo (Latchmore et al., 2018). El desarrollo conjunto de proyectos de investigación (cuadro 8.2) puede reducir estas brechas y garantizar que sean contextualmente relevantes y estén liderados por los pueblos indígenas y las comunidades locales.

Cuadro 8.2 Desarrollo conjunto de una estrategia para la investigación sobre el agua para los pueblos indígenas y comunidades locales

Global Water Futures es un programa de investigación pan-canadiense diseñado con personas expertas en materia de agua y depositarias del conocimiento de los pueblos indígenas y comunidades locales. Los criterios de evaluación de proyectos y propuestas de investigación fueron diseñados conjuntamente por miembros del mundo académico y depositarios del conocimiento indígena, un proceso que finalmente identificó temas prioritarios para proyectos de investigación según los valores de los pueblos indígenas y comunidades locales.

Las áreas clave identificadas incluían: desarrollo de capacidades en monitoreo y adquisición de datos para promover la ciencia ciudadana; apoyo al intercambio de datos y aplicaciones informáticas; mejora de la comprensión de las necesidades y los flujos ambientales; y reconocimiento de las coincidencias y diferencias entre los enfoques occidentales y los de los pueblos indígenas y comunidades locales en materia de ciencia y conocimiento (GWF, s.f.). Con base en las experiencias presentadas en un taller, se elaboró una convocatoria de propuestas, y las propuestas codirigidas por indígenas fueron revisadas por pares por poseedores de conocimiento de los pueblos indígenas y comunidades locales. Los proyectos resultantes abordaron las preocupaciones de los pueblos indígenas y comunidades locales en materia de agua y se presentaron en la Conferencia de las Naciones Unidas de 2023 sobre el Examen Amplio de Mitad de Período del Logro de los Objetivos del Decenio Internacional para la Acción “Agua para el Desarrollo Sostenible” (2018-2028).

A partir de este proceso, se reunió a representantes indígenas de toda la red de investigación para compartir sus perspectivas sobre la investigación colaborativa en materia de agua. Titulada “Todos Juntos”, la declaración de 2023 comenzó reafirmando: “*tenemos la responsabilidad de diseñar la investigación como guardianes de nuestras tierras, aguas y pueblos*” (GWF, 2023, p. 2). La declaración identificó además un espacio ético donde el bienestar comunitario es un objetivo primordial, la investigación observa y se atiene a los protocolos locales, el conocimiento se apoya y financia equitativamente, y la propiedad intelectual permanece en las comunidades. Este enfoque colaborativo toma en consideración los entornos hídricos de montaña y es aplicable a ellos.

Los pueblos indígenas y comunidades locales en regiones montañosas pueden proporcionar perspectivas profundas y bien fundamentadas a largo plazo sobre los impactos de los cambios en la criosfera y sus consecuencias. El conocimiento colectivo de los pueblos indígenas y comunidades locales representa un recurso importante y poco estudiado, especialmente en regiones sobre las cuales se dispone de escasa información y datos.

Respecto a las altas montañas de Asia, la literatura científica sobre avalanchas de nieve y hielo es limitada. Sin embargo, la concienciación local sobre los peligros relacionados con la criosfera es bien arraigada en las comunidades afectadas y se ha transmitido de generación en generación (Acharya et al., 2023). En Nepal, algunos muros sagrados budistas se alzan en lugares que históricamente han sido zonas de escape de avalanchas, un peligro particularmente peligroso para las poblaciones de pastores de yaks de la zona (Emerman et al., 2016; Acharya et al., 2023). Los muros representan recordatorios de no cruzar ni construir estructuras en los senderos, ya que es aquí donde las deidades han expresado su ira mediante riesgos naturales. Estas formas culturales de conocimiento se han transmitido de generación en generación, pero no suelen ser captadas ni reconocidas por la ciencia occidental.

8.3 Fortalecimiento de capacidades

● ● ●
Las competencias técnicas son la base necesaria sobre la cual las agencias y los servicios en el ámbito de la toma de decisiones deben aspirar a mejorar

8.3.1 Necesidades institucionales y desarrollo de capacidades humanas

Los límites políticos rara vez coinciden con los de las cuencas hidrográficas. Esto hace que la gestión de las cuencas hidrográficas de montaña sea jurisdiccionalmente compleja y dependa de la cooperación, la comunicación y el intercambio de datos entre diversas unidades políticas, también a nivel transfronterizo (por ejemplo, entre municipios, regiones subnacionales y países). Una cuenca hidrográfica determinada puede no tener la misma extensión espacial que los acuíferos subterráneos subyacentes o los campos de hielo suprayacentes, lo que añade una capa adicional de complejidad a la gobernanza a la hora de garantizar el acceso al agua.

La gestión de los recursos hídricos también puede estar fragmentada dentro de las unidades políticas, ya que los distintos sectores y autoridades interactúan con el agua de diferentes maneras. El agua utilizada para el consumo humano, el saneamiento y la higiene puede ser competencia de la salud pública, mientras que el agua utilizada para el riego puede estar bajo la jurisdicción de las instituciones responsables de la agricultura, y el agua utilizada para la generación de energía hidroeléctrica puede estar bajo la jurisdicción del desarrollo económico; sin embargo, es posible que todos estos sectores se abastezcan de agua de la misma fuente.

Por lo tanto, la gestión de la diversidad y complejidad de los recursos hídricos requiere la contribución de diversas disciplinas y actores. El fortalecimiento de las capacidades institucionales para abordar estos desafíos requiere programas de formación transversales, que incluyan formación básica en ciencias físicas y sociales relevantes para la montaña. La transdisciplinariedad también debe complementarse con la capacidad integradora: la capacidad de utilizar diferentes tipos y fuentes de datos y opiniones, específicos de cada disciplina y potencialmente contradictorios, y aun así elegir un camino a seguir. Tomar estas decisiones ante prioridades contradictorias y la escasez de recursos, como ocurre cada vez más con el agua, requiere importantes habilidades técnicas y capacidad integradora. Las competencias técnicas son la base necesaria sobre la cual las agencias y los servicios en el ámbito de la toma de decisiones deben aspirar a mejorar las “habilidades blandas” necesarias para promover la mediación en los procesos de intercambio, incluidas las habilidades analíticas, de comunicación y de resolución de problemas, la capacidad de comprender las perspectivas de los demás y la de defender decisiones.

● ● ●
**La ciencia
ciudadana puede
informar y apoyar
los procesos de
toma de decisiones
a nivel local**

A nivel institucional, es necesario tomar en cuenta el tiempo y los recursos necesarios para reunir a personas y perspectivas diversas. No se debe subestimar el tiempo que requieren estos procesos, ni dar por sentado la voluntad o la capacidad de colaboración. Los modelos de gobernanza colaborativa a menudo implican compromisos que, si bien son beneficiosas para la sociedad a largo plazo, pueden resultar indeseables para quienes se benefician actualmente del *statu quo*. Establecer una visión clara y coherente para el futuro puede ser vital ante perspectivas divergentes. Los valores consensuados pueden crear un marco en el cual las diferentes partes puedan llegar a acuerdos (por ejemplo, “agua potable para todos”). Aunque potencialmente laborioso, un diálogo significativo es fundamental para el desarrollo sostenible de políticas y proyectos. El diálogo inclusivo puede reducir el riesgo de resultados imprevistos, empoderar a los grupos marginados y fomentar la responsabilidad de las personas involucradas en los procesos de toma de decisiones.

8.3.2 Ciencia ciudadana y participación comunitaria

Se ha propuesto la participación del público en los procesos científicos como una forma de reducir la brecha de capacidades y fomentar la concienciación y el aprecio por el entorno natural (UNESCO, 2021). La ciencia ciudadana se refiere al conocimiento recopilado y creado científicamente por miembros de la comunidad (McDonough MacKenzie et al., 2017). La participación en proyectos de ciencia ciudadana puede abrir valiosas vías para la interacción pública con el entorno local, mejorar la alfabetización científica e impulsar las carreras de investigación (Rigler et al., 2022). La ciencia ciudadana también puede ser un mecanismo poderoso para empoderar a las jóvenes generaciones y a las mujeres, brindándoles experiencia laboral y roles de liderazgo, además de atender las necesidades de la comunidad. En regiones donde los datos son escasos, como las montañas, la ciencia ciudadana cobra cada vez más interés como medio para cubrir las brechas en la capacidad de monitoreo.

Para que los proyectos de ciencia ciudadana orienten los procesos científicos, la metodología y las mediciones deben ser sólidas y verificables en cuanto a consistencia, precisión y validez (McDonough MacKenzie et al., 2017). La colaboración entre organizaciones de investigación y grupos comunitarios, en cuyo marco los investigadores y las investigadoras desarrollan métodos y proyectos de educación y formación, es un enfoque común para garantizar el cumplimiento de este requisito (Rigler et al., 2022; véase, por ejemplo, el cuadro 8.3). En este proceso, la población local debería aportar ideas sobre el alcance del proyecto para garantizar que los resultados en términos de conocimiento satisfagan las necesidades de su comunidad.

Los proyectos de ciencia ciudadana se presentan en diversas formas. Los datos comunes obtenidos mediante *crowdsourcing* en regiones montañosas tienen que ver con el seguimiento de la fauna silvestre (Rueda-Urbe et al., 2024), la identificación de plantas y el mapeo fenológico (Bison et al., 2019) y las observaciones de caudales fluviales (Etter et al., 2020; Scheller et al., 2024). Los enfoques para la participación pública basados en el web, en concreto las aplicaciones intuitivas que permiten a las personas involucradas subir imágenes y cifras a una plataforma de monitoreo, son de creciente interés en regiones remotas o escasamente monitoreadas (Rigler et al., 2022). Sin embargo, la evaluación de la validez de los datos, a diferencia de su uso, sigue siendo el principal objetivo de la literatura sobre ciencia ciudadana (McDonough MacKenzie et al., 2017; Strobl et al., 2020).

Las preocupaciones sobre la validez son el principal obstáculo para la ciencia ciudadana como medio para cubrir brechas. Para la investigación y las aplicaciones científicas, deben cumplirse normas de medición como las de la Organización Internacional de Normalización, y la coherencia debe ser verificable. La publicación de conjuntos de datos revisados por pares en proyectos de ciencia ciudadana sería beneficiosa. Sin embargo, esto implica

Cuadro 8.3 El Centro de Investigación sobre Ecosistemas de Altura: un legado de ciencia ciudadana en los Alpes

En Francia, el Centro de Investigaciones sobre Ecosistemas de Altura (CREA-Mont Blanc) lleva implementando programas de ciencia ciudadana desde 2004. Más de 5 000 miembros de la comunidad han participado en programas de investigación en ocho proyectos de ciencia ciudadana, que en conjunto han recopilado más de 40 000 datos (por ejemplo, características fenológicas de las plantas, como las fechas de brotación/floración y el cambio de color de las hojas). Un centro en línea clasifica los proyectos según el nivel de competencias necesario e incluye instrucciones y procedimientos para los participantes. Los hallazgos se publican a través de un portal en línea, gestionado por profesionales de la investigación. Por ejemplo, Phénoclim, el proyecto insignia de ciencia ciudadana de CREA, genera datos de fenología vegetal y se ha utilizado para estudiar los impactos del clima en los ecosistemas alpinos (Bison et al., 2019).

la necesidad de cierta supervisión y participación por parte de las instituciones de investigación y monitoreo, lo que somete a la ciencia ciudadana a limitaciones de capacidad y recursos similares a las de los enfoques institucionales tradicionales.

El valor de la ciencia ciudadana no debe limitarse a la investigación y el monitoreo. Puede ser una herramienta valiosa para la divulgación, la educación, la participación comunitaria y la alfabetización respecto a las disciplinas científicas y los entornos montañosos. También puede informar y apoyar los procesos de toma de decisiones a nivel local (Etter et al., 2023).

8.4 Intercambio de información y comunicación

Existen varios pasos entre la generación de datos y productos de información y su uso en el marco de las políticas. La información para la toma de decisiones a menudo debe sintetizarse y comunicarse en función de objetivos específicos (por ejemplo, probabilidades estadísticas de eventos extremos, proyecciones sobre rendimientos de cultivos y rentabilidad económica, o distribución y salud de las especies a lo largo del tiempo), mientras que las comunicaciones dirigidas al público general pueden centrarse en “ideas generales simples”, sin detalles específicos. Los organismos (por ejemplo, los gubernamentales, los de financiación y los de investigación) deben tener cuidado de distinguir entre las estadísticas locales y las globales, especialmente cuando se trata de la criosfera de las montañas, ya que la complejidad de la dinámica de los recursos hídricos de las montañas a menudo se caracteriza erróneamente (véase el cuadro 2.2).

Generar información relevante a partir de datos hidrometeorológicos brutos exige capacidades institucionales considerables. Datos como temperatura, precipitación, caudal, masa glaciar y humedad del suelo deben manipularse y analizarse repetidamente antes de utilizarlos. Por ejemplo, las mediciones físicas deben cargarse en repositorios de datos y luego ser corregidas y validadas por técnicos de investigación; los conjuntos de datos brutos deben introducirse en bases de datos y visualizarse o modelarse para su interpretación; la validez y utilidad de los modelos deben comprobarse rigurosamente; y el cálculo del riesgo y el significado de las tendencias de los datos a lo largo del tiempo deben traducirse a un lenguaje adecuado para el público objetivo. Cada uno de estos pasos de transformación requiere ciertas competencias, que van desde la capacidad técnica para interpretar datos, recursos financieros para mantener inventarios de datos históricos, habilidades comunicativas para traducir la información en necesidades políticas y un lenguaje fácil de usar, hasta recursos humanos para facilitar los vínculos en cada paso (Schuster-Wallace et al., 2015).

● ● ●
Una sola línea de datos o un único enfoque analítico rara vez bastará para fundamentar las decisiones políticas

Una sola línea de datos o un único enfoque analítico rara vez bastará para fundamentar las decisiones políticas. Esto implica la necesidad adicional de que los órganos decisorios posean capacidad integradora, es decir, la capacidad de considerar las necesidades y aportaciones de múltiples sectores simultáneamente (sección 8.3.1). La función principal de los organismos hidrológicos e hidrometeorológicos es proporcionar información sobre el estado del clima, los fenómenos extremos y las tendencias de los recursos hídricos para contribuir a la gestión de riesgos (OMM, 2020). Sin embargo, la diversidad de usos y demandas de los recursos hídricos implica que los proyectos tradicionales de gestión del agua también deben considerar, por ejemplo, datos adicionales no hidrológicos, como los datos socioeconómicos, la dinámica de los ecosistemas, las estructuras políticas que rigen los derechos al agua y los acuerdos transfronterizos, y las brechas de accesibilidad en función del género, la edad, la etnia y la clase (OMM, 2009; Rowe y Schuster-Wallace, 2023).

Para garantizar un proceso de toma de decisiones efectivo, se necesita disponer de una gran variedad de tipos de información simultáneamente, que deben estar disponibles o comunicados de manera que los proyectos intersectoriales y transversales resulten compatibles con otras intervenciones. Esto puede suponer un reto para las agencias de evaluación, que deben considerar una amplia gama de usuarios del agua y formatos de datos, lo que requiere habilidades y formación diversificadas, experiencia técnica del personal y la necesidad de revisiones continuas de los alcances y procesos de recopilación de datos.

La naturaleza transversal de los recursos hídricos y los ecosistemas montañosos puede dificultar la gestión de datos y la prestación de servicios operativos. Las capacidades institucionales para la interpretación de datos y la toma de decisiones pueden enfrentarse a barreras de responsabilidad, ya que, sin mandatos o políticas explícitas para abordar las temáticas relativas a las regiones de alta montaña teniendo en cuenta consideraciones intersectoriales, los aspectos ecosistémicos, humanos e hidrometeorológicos pueden quedar aislados. La adopción de una gestión integrada en los marcos de políticas y la legislación puede ser necesaria para garantizar enfoques holísticos de los desafíos, y también la institucionalización de la cooperación entre cuencas mediante acuerdos transfronterizos.

Las redes de intercambio de información (por ejemplo, véase el cuadro 8.1), las colaboraciones intersectoriales y la participación de las partes interesadas pueden ser herramientas poderosas para reducir las brechas de capacidad de integración y generar resultados sostenibles. El diálogo inclusivo crea oportunidades para que se planteen otras consideraciones. La participación en los procesos de toma de decisiones a nivel local puede ser fundamental para garantizar la viabilidad a largo plazo de las políticas y los proyectos. La desconfianza o los prejuicios, por ejemplo, contra instituciones extranjeras o coloniales, pueden obstaculizar la implementación de proyectos a escala local (cuadro 8.4).

Estas situaciones sirven como recordatorio de que incluso los enfoques técnicos deben integrarse en los contextos sociales, políticos y culturales, y que la eficacia de los sistemas basados en datos depende de la aceptación a nivel local. Sin un diseño de proyecto inclusivo —que incluya la comunicación y la educación sobre la intención de la investigación y los resultados previstos—, no se puede lograr la sostenibilidad (Huggel et al., 2020). Como se resume en la *Declaración de Dusambé* de 2022 del Grupo de alto nivel sobre la mejora del conocimiento, la educación y la comunicación, es necesario seguir invirtiendo en la participación comunitaria, en mecanismos de comunicación innovadores, en repositorios de soluciones y datos, en investigación para generar impacto y en una mayor capacidad y concienciación en todos los sectores e instituciones (Segunda Conferencia de Alto Nivel sobre el Decenio Internacional para la Acción “Agua para el desarrollo sostenible” [2018-2028], 2022).

Cuadro 8.4 Más allá de la capacidad técnica: la importancia de la confianza en el éxito del proyecto

La Laguna 513, en la Cordillera Blanca de los Andes peruanos, es un lago que se formó en la década de 1960 tras la recesión de glaciares. Desde entonces, ha sido fuente de repetidas inundaciones por desbordamiento repentino de lagos glaciares (véase la sección 2.2.3; Huggel et al., 2020). Tras un desbordamiento en 2010 que dañó tanto la infraestructura municipal como las tierras agrícolas en la ladera inferior del lago, las autoridades locales y nacionales, con la ayuda de expertos y organizaciones internacionales, desarrollaron rápidamente un sistema de alerta temprana (SAT) para los desbordamientos repentinos de lagos glaciares a fin de proteger a los habitantes de futuros eventos de ese tipo. Sin embargo, cinco años después de la implementación del SAT, en 2016, un grupo de lugareños desmanteló la instrumentación de monitoreo de la Laguna 513. Las condiciones de sequía extrema habían fomentado rumores de que el equipo técnico estaba contribuyendo de alguna manera a la falta de precipitaciones, y la mezcla de desconfianza y desesperación llevó a los lugareños a actuar.

Desde la perspectiva del desarrollo de capacidades, una importante conclusión del evento de la Laguna 513 es que, a pesar del éxito operativo del SAT, el contexto social se convirtió en un factor determinante para su éxito general. El caso de Laguna 513 no es aislado; se han observado casos de interferencia local con proyectos operados por extranjeros en otras partes del Perú, el Himalaya, los Andes y los Alpes. Si bien el desarrollo del proyecto y la capacidad técnica son importantes, en definitiva, la aceptación y la comprensión de las soluciones implementadas por parte de las comunidades involucradas son necesarias para que dichas soluciones tengan un impacto duradero (Huggel et al., 2020).

8.5 Conclusiones

Abordar los impactos de los cambios en la criosfera montañosa depende en gran medida de las observaciones que se realizan, así como del conocimiento y las competencias que se tienen, tanto en las regiones montañosas como aguas abajo. La escasez de observaciones a nivel hidrometeorológico, criosféricos y ecológicos a gran altitud dificulta la validación y la representatividad de los modelos en entornos de alta montaña. Esto constituye un obstáculo importante para el desarrollo de soluciones a los impactos de los cambios criosféricos.

El fortalecimiento de las capacidades de los servicios de monitoreo para generar datos hidrometeorológicos básicos y realizar análisis localizados para mejorar la precisión de los modelos debe ser una prioridad. Disponer de datos abundantes y fiables es fundamental para garantizar un proceso de toma de decisiones efectivo. Las redes de intercambio de información y datos a escala nacional y regional (por ejemplo, los centros regionales del clima que facilitan programas de monitoreo a largo plazo y lideran la producción y difusión de productos y servicios), así como la ciencia ciudadana, ofrecen medios para reducir la falta de datos (OMM, 2024).

La integración de estrategias de observación, modelización y servicios puede ayudar a superar los obstáculos al desarrollo en las cuencas montañosas. Las mejoras en la capacidad técnica también deben complementarse con inversiones en capacidad humana. La educación transdisciplinaria y la capacitación en comunicación en las instituciones responsables de la toma de decisiones en las regiones montañosas y las zonas aguas abajo son particularmente importantes en este sentido. Los pueblos indígenas y las comunidades locales también deben participar en los procesos de toma de decisiones y hay que respetar sus diferentes sistemas de conocimiento.

La necesidad y el interés en abordar los cambios de la criosfera de las montañas son urgentes, pero para hacerlo es necesario que todos trabajen juntos, más allá de las fronteras gubernamentales y sociales.

Referencias

- Acharya, A., Steiner, J. F., Walizada, K. M., Ali, S., Zakir, Z. H., Caiserman, A. y Watanabe, T. 2023. Snow and ice avalanches in high mountain Asia - scientific, local and indigenous knowledge. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 23, pp. 2569-2592. doi.org/10.5194/nhess-23-2569-2023.
- Adler, C., Huggel, C., Orlove, B. y Nolin, A. 2019. Climate change in the mountain cryosphere: Impacts and responses. *Regional Environmental Change*, Vol. 19, pp. 1225-1228. doi.org/10.1007/s10113-019-01507-6.
- Amnistía Internacional. s.f. Indigenous Peoples' Rights. Sitio web de Amnesty International. www.amnesty.org/en/what-we-do/indigenous-peoples/#:~:text=Overview,speak%20more%20than%204%2C000%20languages (consultado el 22 de octubre de 2024).
- Bales, R. C., Molotch, N. P., Painter, T. H., Dettinger, M. D., Rice, R. y Dozier, J. 2006. Mountain hydrology of the western United States. *Water Resources Research*, Vol. 42, No. 8. doi.org/10.1029/2005WR004387.
- Bison, M., Yoccoz, N. G., Carlson, B. Z. y Delestrade, A. 2019. Comparison of budburst phenology trends and precision among participants in a citizen science program. *International Journal of Biometeorology*, Vol. 63, No. 1, pp. 61-72. doi.org/10.1007/s00484-018-1636-x.
- Cave, K. y McKay, S. 2016. Water song: Indigenous women and water. *Solutions*, Vol. 7, No. 6, pp. 64-73.
- Cogley, J. G., Hock, R., Rasmussen, L. A., Arendt, A. A., Bauder, A., Braithwaite, R. J., Jansson, P., Kaser, G., Möller, M., Nicholson, L. y Zemp, M. 2011. *Glossary of Glacier Mass Balance and Related Terms*. IHP-VII Technical Documents in Hydrology No. 86, IACS Contribution No. 2. París, Programa Hidrológico Intergubernamental de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO-PHI). unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000192525.
- Emerman, S. H., Adhikari, S., Panday, S., Bhattarai, T. N., Gautam, T., Fellows, S. A., Anderson, R. B., Adhikari, N., Karki, K. y Palmer, M. A. 2016. The integration of the direct and indirect methods in lichenometry for dating Buddhist sacred walls in Langtang Valley, Nepal Himalaya. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, Vol. 48, No. 1, pp. 9-31. doi.org/10.1657/AAAR0015-026.
- Etter, S., Strobl, B., van Meerveld, I. y Seibert, J. 2020. Quality and timing of crowd-based water level class observations. *Hydrological Processes*, Vol. 34, No. 22, pp. 4365-4378. doi.org/10.1002/hyp.13864.
- Etter, S., Strobl, B., Seibert, J., van Meerveld, I., Niebert, K. y Stepenuck, K. 2023. Why do people participate in app-based environment-focused citizen science projects? *Frontiers in Environmental Sciences*, Vol. 11, Artículo 1105682. doi.org/10.3389/fenvs.2023.1105682.
- Fierz, C., Armstrong, R. L., Durand, Y., Etchevers, P., Greene, E., McClung, D. M., Nishimura, K., Satyawali, P. K. y Sokratov, S. A. 2009. *The International Classification for Seasonal Snow on the Ground*. IHP-VII Technical Documents in Hydrology No. 83, IACS Contribution No. 1. París, Programa Hidrológico Intergubernamental de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO-PHI). unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000186462.
- Grupo de trabajo EDW de la MRI (Iniciativa para el Estudio de las Montañas). 2015. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature Climate Change*, Vol. 5, pp. 424-430. doi.org/10.1038/nclimate2563.
- GWF (Global Water Futures). 2023. *Everyone Together. Global Water Futures Mistawasis Nêhiyawak Water Gathering Statement*. GWF, Universidad de Saskatchewan. gwf.usask.ca/indigenization/water-gathering-statement.php.
- . s.f. Indigenous Research Co-Creation. Co-developing a Strategy for Indigenous Community Water Research. Sitio web del GWF. Universidad de Saskatchewan. gwf.usask.ca/km/co-creation.php#CoCreationWorkshop (consultado el 17 de mayo de 2024).
- Huggel, C., Cochachin, A., Drenkhan, F., Fluixá-Sanmartín, J., Frey, H., García Hernández, J., Jurt, C., Muñoz, R., Price, K. y Vicuña, L. 2020. El lago glacial 513 (Perú). Lecciones para el desarrollo de un servicio de alerta temprana. *Boletín de la OMM*, Vol. 69, No. 1, pp. 45-52. library.wmo.int/idurl/4/46737.
- ICIMOD (Centro Internacional para la Ordenación Integrada de las Montañas). 2023. *Water, Ice, Society, and Ecosystems in the Hindu Kush Himalaya: An Outlook* [P. Wester, S. Chaudhary, N. Chettri, M. Jackson, A. Maharjan, S. Nepal y J. F. Steiner (eds)]. Katmandú, ICIMOD. doi.org/10.53055/ICIMOD.1028.
- IPBES (Plataforma Intergubernamental Científico-Normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas). 2022. *Summary for Policymakers of the Methodological Assessment Report on the Diverse Values and Valuation of Nature of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. Bonn, Alemania, Secretaría del IPBES. doi.org/10.5281/zenodo.6522392.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2019. *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Reino Unido/Nueva York, Cambridge University Press. doi.org/10.1017/9781009157964.
- Karki, R., Hasson, S. U., Schickhoff, U., Scholten, T. y Böhner, J. 2017. Rising precipitation extremes across Nepal. *Climate*, Vol. 5, No. 1, p. 4. doi.org/10.3390/cli5010004.
- Kelkar, G. y Tshering, P. 2002. *Women of the Mountains: Gender Roles, Relations, Responsibilities and Rights*. Actas de la Conferencia del Centro Internacional para la Ordenación Integrada de las Montañas (ICIMOD), Paro, Octubre, pp. 1-4. lib.icimod.org/record/21093.
- Latchmore, T., Schuster-Wallace, C. J., Roronhiakewen Longboat, D., Dickson-Anderson, S. E. y Majury, A. 2018. Critical elements for local Indigenous water security in Canada: A narrative review. *Journal of Water and Health*, Vol. 16, No. 6, pp. 893-903. doi.org/10.2166/wh.2018.107.
- McDonough MacKenzie, C. M., Murray, G., Primack, R. y Weihrauch, D. 2017. Lessons from citizen science: Assessing volunteer-collected plant phenology data with Mountain Watch. *Biological Conservation*, Vol. 208, pp. 121-126. doi.org/10.1016/j.biocon.2016.07.027.
- Mengist, W., Soromessa, T. y Legese, G. 2020. Ecosystem services research in mountainous regions: A systematic literature review on current knowledge and research gaps. *Science of the Total Environment*, Vol. 702, Artículo 134581. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134581.
- Milner, A. M., Khamis, K., Battin, T. J., Brittain, J. E., Barrand, N. E., Füreder, L., Cauvy-Fraunié, S., Már Gíslason, G., Jacobsen, D., Hannah, D. M., Hodson, A. J., Hood, E., Lencioni, V., Ólafsson, J. S., Robinson, C. T., Tranter, M. y Brown, L. E. 2017. Glacier shrinkage driving global changes in downstream systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, Vol. 114, No. 37, pp. 9770-9778. doi.org/10.1073/pnas.1619807114.
- Naciones Unidas. 2024. *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2024: Agua para la prosperidad y la paz*. París, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000391195.
- . s.f. Día Internacional de los Pueblos Indígenas del Mundo. Sitio web de la Naciones Unidas. www.un.org/en/observances/indigenous-day/background (consultado el 19 de junio de 2024).
- NCEI NOAA (Centros Nacionales de Información Ambiental, Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica). s.f. Global Historical Climatology Network daily (GHCNd) [Dataset]. Sitio web del NCEI NOAA. www.ncei.noaa.gov/products/land-based-station/global-historical-climatology-network-daily (consultado el 16 de mayo de 2024).

- OMM (Organización Meteorológica Mundial). 2009. *Guía de prácticas hidrológicas Volumen II: Gestión de recursos hídricos y aplicación de prácticas hidrológicas*. OMM-N° 168. Ginebra, OMM. library.wmo.int/idurl/4/33046.
- . 2020. *Guía de Prácticas Hidrológicas, vol. I: Hidrología – De la medición a la información hidrológica*. OMM-N° 168. Ginebra, OMM. library.wmo.int/idurl/4/32737.
- . 2024. Inaugural Session of the Third Pole Climate Forum (TPCF 1) and Meeting of Third Pole Regional Climate Centre Network (TPRCC-Network) Task Team. Sitio web del OMM. community.wmo.int/en/en/activity-areas/climate/meetings/inaugural-session-third-pole-climate-forum-tpcf-1-and-meeting-third-pole-regional-climate-centre-network-tpcc-network-task-team.
- Østrem, G. 2006. History of scientific studies at Peyto Glacier. M. N. Demuth, D. S. Munro y G. J. Young (eds), *Peyto Glacier – One Century of Science*. Saskatoon, Canadá, National Water Research Institute Science, Environment Canada, pp. 1-23.
- Pomeroy, J. y Marks, D. (eds). 2024. Hydrometeorological data from mountain and alpine research catchments. [Special issue]. *Earth System Science Data*. essd.copernicus.org/articles/special_issue871.html.
- Pomeroy, J. W., Bernhardt, M. y Marks, D. 2015. Research network to track alpine water. *Nature*, Vol. 521, pp. 32-32. doi.org/10.1038/521032c.
- Pomeroy, J. W., Brown, T., Fang, X., Shook, K. R., Pradhananga, D., Armstrong, R., Harder, P., Marsh, C., Costa, D., Krogh, S. A., Aubry-Wake, C., Annand, H., Lawford, P., He, Z., Kompanizare, M., López, J. I. y Moreno, J. L. 2022. The cold regions hydrological modelling platform for hydrological diagnosis and prediction based on process understanding. *Journal of Hydrology*, Vol. 615, Artículo 128711. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128711.
- Pradhananga, D. y Pomeroy, J. W. 2022. Diagnosing changes in glacier hydrology from physical principles using a hydrological model with snow redistribution, sublimation, firnification and energy balance ablation algorithms. *Journal of Hydrology*, Vol. 608, Artículo 127545. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127545.
- Rauniyar, T. 2024. The drought that forced a Himalayan village in Nepal to relocate. BBC News, 23 de mayo de 2024. www.bbc.com/future/article/20240522-the-drought-that-forced-a-himalayan-village-in-nepal-to-relocate.
- Rigler, G., Dokou, Z., Khadim, F. K., Sinshaw, B. G., Eshete, D. G., Aseres, M., Amera, W., Zhou, W., Wang, X., Moges, M., Azage, M., Li, B., Holzer, E., Tilahun, S., Bagtzoglou, A. y Anagnostou, E. 2022. Citizen science and the Sustainable Development Goals: Building social and technical capacity through data collection in the upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Sustainability*, Vol. 14, No. 6, Artículo 3647. doi.org/10.3390/su14063647.
- Rowe, A. M. y Schuster-Wallace, C. 2023. Implementing EDI across a large formal research network: Contributing to equitable and sustainable water solutions for a changing climate. *Geoforum*, Vol. 147, Artículo 103881. doi.org/10.1016/j.geoforum.2023.103881.
- Rueda-Urbe, C., Herrera-Alsina, L., Lancaster, L. T., Capellini, I., Layton, K. K. y Travis, J. M. 2024. Citizen science data reveal altitudinal movement and seasonal ecosystem use by hummingbirds in the Andes Mountains. *Ecography*, Vol. 2024, No. 3, Artículo e06735. doi.org/10.1111/ecog.06735.
- Scheller, M., van Meerveld, I., Sauquet, E., Vis, M. y Seibert, J. 2024. Are temporary stream observations useful for calibrating a lumped hydrological model? *Journal of Hydrology*, Vol. 632, Artículo 130686. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130686.
- Schuster-Wallace, C. J., Sandford, R., Dickin, S. K., Vijay, M., Laycock, K. y Adeel, Z. 2015. *Water in the World We Want: Catalysing National Water-Related Sustainable Development*. Hamilton, Canadá, Instituto para el Agua, el Medio Ambiente y la Salud de la Universidad de las Naciones Unidas (UNU-INWEH). reliefweb.int/report/world/water-world-we-want-catalysing-national-water-related-sustainable-development.
- Segunda Conferencia de Alto Nivel sobre el Decenio Internacional para la Acción "Agua para el Desarrollo Sostenible" (2018-2028). 2022. *Final Declaration from Dushanbe 2022 to New York 2023*. Dusanbé, 6-9 de junio de 2022. dushanbewaterprocess.org/wp-content/uploads/2022/06/2022-final-declaration-final-draft-0608-en-final-1.pdf.
- Strobl, B., Etter, S., van Meerveld, I. y Seibert, J. 2020. Accuracy of crowdsourced streamflow and stream level class estimates. *Hydrological Sciences Journal, Special Issue: Hydrological Data: Opportunities and Barriers*, Vol. 65, No. 5. doi.org/10.1080/02626667.2019.1578966.
- Tsosie, R. A. 2007. Indigenous People and environmental justice: The impact of climate change. *University of Colorado Law Review*, Vol. 78, p. 1625.
- UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura). 2021. *Recomendación de la UNESCO sobre la Ciencia Abierta*. París, UNESCO. unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000379949_spa.

Capítulo 9

Gobernanza y financiación

WWAP de la UNESCO

Matthew England y Richard Connor

Con contribuciones de: Ansgar Fellendorf (PNUMA)

• • •

El papel de la gobernanza del agua en las montañas no ha recibido tanta atención como en las tierras más bajas

El término “gobernanza del agua” hace referencia a la gestión del agua, es decir, a las políticas, instituciones y procesos de toma de decisiones que regulan el uso y la conservación del recurso²⁰. La gobernanza del agua en las montañas se ha desarrollado de forma singular a lo largo del tiempo y se adapta al contexto específico de cada cordillera. El papel de la gobernanza del agua en las montañas no ha recibido tanta atención como en las tierras más bajas, en las que se ha trabajado mucho, por ejemplo, mediante la gestión integrada de los recursos hídricos (Molden et al., 2013).

La gobernanza del agua en las montañas requiere atención en el contexto de la creciente competencia por el agua, la dinámica cambiante del clima y sus impactos, así como otros desafíos globales. La creciente presión sobre los recursos hídricos derivada del desarrollo socioeconómico, sumada a los cambios en la disponibilidad estacional de agua, de la estación cálida a la fría, aumenta la complejidad de la gobernanza del agua. Se requiere mayor comprensión y colaboración a diversos niveles y escalas, tanto en las montañas como aguas abajo, para abordar los complejos desafíos relacionados con la gobernanza y los sistemas socioecológicos. En el discurso y la práctica actuales, la gobernanza de las aguas de montaña suele equipararse a la protección de las fuentes y la gestión de cuencas hidrográficas, y a cómo afectará y beneficiará a los usuarios aguas abajo en las tierras bajas.

Este capítulo presenta, en primer lugar, una visión general de la gobernanza del agua en las montañas mediante acuerdos internacionales y marcos de políticas. A continuación, examina los convenios regionales para la cooperación en cuencas hidrográficas transfronterizas, dado que muchos ríos nacen en las montañas y cruzan fronteras internacionales. A continuación, se presenta una visión general de las políticas nacionales y su implementación, en relación con los intereses de desarrollo y la gestión comunitaria de sus aguas. Por último, se exploran los aspectos financieros de la gobernanza de las aguas de montaña.

9.1 Gobernanza de las aguas de montaña a nivel internacional

Los marcos políticos internacionales ofrecen un apoyo prometedor a la gobernanza de las aguas y la adaptación al cambio climático en las montañas, al tiempo que abordan el desarrollo sostenible. La evidencia sugiere que los tratados y convenios son facilitadores relevantes para promover la cooperación y las estrategias de implementación a escala de las regiones montañosas (Dinar et al., 2016). Sin embargo, a nivel mundial, hay pocos datos que permitan evaluar sistemáticamente su eficacia para abordar los retos específicos que plantean los cambios en la criosfera de las montañas (Hock et al., 2019).

Históricamente, son varios los acuerdos que han llevado al desarrollo de los marcos internacionales para las montañas. La importancia de las montañas se reconoció formalmente a escala internacional en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo de 1992. El capítulo 13 del *Plan de Acción del Programa 21* se dedicó al desarrollo sostenible de las montañas (CNUMAD, 1992). En él se destacaba: la importancia de los entornos montañosos a escala mundial, regional y local; la protección de los recursos naturales, incluida el agua; la mejora de los medios de subsistencia de las comunidades y los pueblos indígenas; y el fomento

²⁰ El informe especial *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* (El océano y la criosfera en un clima cambiante) se refiere a la gobernanza como un “esfuerzo por establecer, reafirmar o cambiar instituciones formales e informales a todas las escalas para negociar relaciones, resolver conflictos sociales y obtener ganancias mutuas” (IPCC, 2019, p. 687).

● ● ●
Los marcos políticos internacionales ofrecen un apoyo prometedor a la gobernanza de las aguas y la adaptación al cambio climático en las montañas

de la cooperación internacional en materia de montañas. Al aprobar el capítulo 13 al más alto nivel político, con la participación de más de 178 Estados Miembros de las Naciones Unidas, la comunidad internacional señaló formalmente por primera vez su preocupación común y su plan de acción (Romeo et al., 2022).

Una década más tarde, las Naciones Unidas declararon 2002, Año Internacional de las Montañas. El documento final de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible, titulado *El futuro que queremos*, reconoció que “los ecosistemas montañosos desempeñan un papel crucial al proporcionar recursos hídricos a una gran parte de la población mundial” (Asamblea General de las Naciones Unidas, 2012, p. 46).

En 2008, la Asamblea General de las Naciones Unidas adoptó la Resolución 62/196 sobre el desarrollo sostenible de las montañas. En ella se reconocía que las montañas ofrecen indicios del cambio climático, a través del retroceso de los glaciares y los cambios en la escorrentía estacional que pueden afectar a las fuentes de agua dulce. Se identificaron retos para el desarrollo sostenible de las montañas, como la creciente demanda de agua (sobre todo aguas abajo) y las consecuencias de la erosión, la deforestación, la degradación de las cuencas hidrográficas y las catástrofes naturales. La resolución destacaba la importancia de las montañas como cabeceras de cuenca y fuentes de agua para las zonas aguas abajo, a menudo densamente pobladas (Asamblea General de las Naciones Unidas, 2008).

Más recientemente, la Asamblea General de las Naciones Unidas declaró 2022, Año Internacional del Desarrollo Sostenible de las Montañas, a propuesta del Gobierno de Kirguistán y con el apoyo de 94 países.

Las aguas de montaña también han recibido atención en otros marcos internacionales, como el Acuerdo de París (CMNUCC, 2015) y el Marco de Sendái para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030 (Asamblea General de las Naciones Unidas, 2015a). Estos marcos destacaron la importancia del seguimiento y la presentación de informes sobre objetivos e indicadores relevantes para la gobernanza del agua.

El Convenio sobre la Protección y Utilización de los Cursos de Agua Transfronterizos y de los Lagos Internacionales (Convenio del Agua) proporciona una plataforma jurídica e intergubernamental única a nivel mundial para la cooperación en la gestión de las aguas transfronterizas, y puede ser decisivo para la gestión sostenible y la conservación de las montañas. El convenio obliga y ayuda a los países a elaborar y aplicar acuerdos transfronterizos y a crear organismos conjuntos de cooperación transfronteriza que abarquen también las regiones de montaña. Además, el convenio garantiza un enfoque “de la fuente al mar” en el que la cuenca, desde aguas arriba hasta aguas abajo, se gestiona como un sistema holístico.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas (Asamblea General de las Naciones Unidas, 2015b) pueden ofrecer perspectivas adicionales para fortalecer la gobernanza del agua en un contexto en el que la criosfera es afectada por varios cambios; el seguimiento y la presentación de datos sobre metas e indicadores clave relacionados con el agua, y su interacción con otros ODS, muestran que el suministro de agua es una condición esencial para el desarrollo. Sin embargo, las pruebas para evaluar su eficacia sobre una base empírica han sido limitadas (Hock et al., 2019).

9.2 Gobernanza regional de las aguas de montaña

La mayoría de los grandes ríos nacen en zonas montañosas y a menudo cruzan fronteras internacionales. La gobernanza de las aguas transfronterizas, basada en una “visión a nivel de cuenca” que tenga en cuenta las aguas de montaña, puede aportar beneficios a los países ribereños. La cooperación regional entre países, incluidas las iniciativas de gobernanza de las cuencas hidrográficas, es un mecanismo importante para avanzar en la adaptación al clima en las zonas montañosas (Molden et al., 2013; Mishra et al., 2019). Los tratados o acuerdos pueden: mejorar la cooperación entre los países ribereños a través de una mayor supervisión y generación de datos para abordar la falta crónica de datos en las regiones de montaña; ayudar a identificar y resolver las brechas en la capacidad técnica humana e institucional; establecer comités de gestión conjunta; promover el intercambio de información; y facilitar y fomentar el diálogo y la diplomacia entre los países ribereños (Adler et al., 2022).

La investigación sobre iniciativas regionales de gobernanza de las montañas ha identificado algunos componentes relevantes para las aguas de montaña (cuadro 9.1). Aunque los acuerdos iniciales entre países ribereños suelen ser insuficientes o demasiado generales para inducir una mayor cooperación, estos acuerdos sientan las bases de tratados adicionales que sí promueven una mayor cooperación²¹ (por ejemplo, los que son más específicos y se dirigen a un problema concreto de la cuenca). La creciente variabilidad hidrológica inducida por el clima impulsa a los países a mostrar un comportamiento cooperativo, sobre todo a escala operativa (por ejemplo, la gestión del agua a partir de infraestructuras compartidas entre países ribereños). Sin embargo, una vez que la variabilidad hidrológica aumenta por encima de cierto umbral, el comportamiento cooperativo puede verse afectado negativamente (Dinar et al., 2016). Los conflictos entre los intereses nacionales en el marco de los acuerdos sobre aguas transfronterizas, así como la ineficacia de las instituciones para gestionar la coordinación en el contexto local, han obstaculizado una cooperación eficaz (Kliot et al., 2001; Hayat et al., 2022).

Cuadro 9.1 Componentes de las iniciativas regionales de gobernanza de las montañas

Entre las principales características de las iniciativas regionales de gobernanza de las zonas de montaña cabe mencionar las siguientes:

- territorialidad: ámbito espacial de la iniciativa, en términos de jurisdicciones de los miembros y ámbito espacial de los acuerdos;
- formalidad institucional: grado de justificación, o informalidad, y medios de aplicación;
- integración sectorial: número de sectores y mecanismos institucionales que los vinculan;
- coordinación vertical: diversidad y naturaleza de la participación de los representantes gubernamentales a distintos niveles, así como aceptación de la subsidiariedad y mecanismos para aplicarla;
- participación de la sociedad civil: grado y naturaleza de la implicación de las organizaciones no gubernamentales y el sector privado;
- interfaz ciencia-política: naturaleza de los mecanismos institucionales de intercambio bilateral entre responsables de la formulación de políticas y miembros de la comunidad científica;
- modalidades de financiación: evaluación de las fuentes de financiación y de los desembolsos, en la medida en que se disponga de información al respecto;
- adaptación basada en los ecosistemas y relacionada con el cambio climático, también para el agua.

Fuente: extraído de Balsiger et al. (2020, pp. 5-6).

²¹ El derecho internacional consuetudinario y los principios generales también rigen los usos de las aguas transfronterizas, lo que puede ser beneficioso para facilitar la cooperación.

• • •
Los conflictos entre los intereses nacionales en el marco de los acuerdos sobre aguas transfronterizas, así como la ineficacia de las instituciones para gestionar la coordinación en el contexto local, han obstaculizado una cooperación eficaz

Los tres acuerdos regionales siguientes son ejemplos de cooperación transfronteriza en materia de aguas de montaña.

La Cordillera del **Hindu Kush Himalaya** (HKH) se extiende a lo largo de 3 500 km y la comparten ocho países (Afganistán, Bangladesh, Bhután, China, India, Myanmar, Nepal y Pakistán). Las montañas son el origen de diez grandes cuencas fluviales. En la región viven 240 millones de personas, y se calcula que 1 650 millones aguas abajo dependen de las aguas de montaña para su suministro de agua potable y saneamiento, alimentos (mediante el regadío), energía (hidroeléctrica) y servicios ecosistémicos (hábitats, caudales ambientales y ricos valores culturales). El agua de deshielo de los glaciares y la nieve es un componente importante del caudal de los arroyos, y sus contribuciones relativas aumentan con la altitud y la proximidad a las reservas de hielo y nieve. Las aguas subterráneas de los manantiales de las colinas centrales de la región del HKH también contribuyen de forma importante al caudal base de los ríos (Wester et al., 2019).

En la región del HKH falta una cooperación transfronteriza eficaz para mejorar la gobernanza del agua. Las iniciativas intergubernamentales se han centrado más en los intereses políticos y económicos (nacionales) que en el bienestar social y medioambiental a escala regional. La gobernanza del agua se caracteriza por regímenes híbridos formales-informales en los que predominan las instituciones informales a nivel local y las instituciones estatales formales a nivel nacional y regional. A menudo faltan sinergia y apoyo entre las instituciones estatales e informales de gestión del agua. Las desigualdades de género prevalecen en las instituciones, lo que se traduce en un acceso desigual a los recursos hídricos. A nivel regional, el intercambio de datos y la mejora de la cooperación en el reparto del agua se ven a menudo obstaculizados por la falta de confianza. El intercambio de datos e información es crucial para la reducción del riesgo de catástrofes a nivel transfronterizo, como las inundaciones provocadas por el desbordamiento repentino de lagos glaciares (véase el sección 2.2.3) y las inundaciones fluviales. La desconfianza entre países ribereños limita la distribución de beneficios en el ámbito del agua y los servicios relacionados, como el riego, la energía y la navegación (Wester et al., 2019).

Se han identificado componentes críticos para mejorar la gobernanza del agua y la cooperación transfronteriza en la región del HKH (véase la sección 7.4). Estos incluyen: la necesidad de marcos formales como base para la cooperación regional; la importancia de las plataformas de intercambio de conocimientos para facilitar la cooperación regional; y la necesidad de un mecanismo adecuado para gestionar los conflictos y distribuir equitativamente los beneficios (Wester et al., 2019).

Mientras que la cooperación transfronteriza a nivel de cuenca hidrográfica (local) tiene una larga historia en la región del HKH, la gobernanza a escala de cordillera es un fenómeno reciente (cuadro 9.2). El lenguaje de la cooperación transfronteriza está algo plagado de agendas e intereses políticos y territoriales. En este contexto, se puede considerar más favorable perseguir la cooperación entre países ribereños en el marco de la cooperación regional sobre las cordilleras.

El **Convenio de los Alpes** (véase la sección 7.2.1), firmado en 1991, es un tratado internacional para abordar la cooperación transfronteriza en los Alpes que cuenta con una secretaría y un órgano de gobierno permanentes (Romeo et al., 2022). El convenio involucra a Alemania, Austria, Eslovenia, Francia, Italia, Liechtenstein, Mónaco, Suiza y la Unión Europea. Es uno de los dos únicos tratados relacionados con las montañas jurídicamente vinculantes, junto con el Convenio de los Cárpatos

Cuadro 9.2 Equipo Especial de Alto Nivel para el Hindu Kush Himalaya (HKH)

Con el objetivo de fortalecer progresivamente la gobernanza en toda la cordillera, los ocho países de la región del HKH crearon el Equipo Especial de Alto Nivel para el HKH, para dar seguimiento a las recomendaciones formuladas anteriormente en el marco del Llamado a la Acción para el HKH (ICIMOD, 2020). Los países aprobaron el Equipo Especial de Alto Nivel durante la primera Cumbre Ministerial (HKH Ministerial Mountain Summit) en 2020. Durante la reunión de ministros de los ocho países se firmó una declaración de importancia histórica en la que se acordaba reforzar la cooperación regional en la región del HKH. Altos funcionarios gubernamentales colaboran ahora en el Equipo Especial de Alto Nivel para el HKH, para supervisar los avances en el Llamado a la Acción para el HKH y evaluar el potencial de los mecanismos institucionales para reforzar la cooperación a nivel regional.

El Llamado a la Acción para el HKH ofrece una hoja de ruta para el futuro de la región, enmarcada en torno a seis acciones:

1. Cooperar a todos los niveles en toda la región del HKH para obtener beneficios mutuos y sostenibles.
2. Reconocer y priorizar la singularidad de la población montañesa del HKH.
3. Adoptar medidas concertadas a todos los niveles en materia de clima para mantener el calentamiento global en 1,5 °C para 2100.
4. Adoptar medidas aceleradas para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible y las nueve prioridades relativas a las zonas de montaña.
5. Aumentar la resiliencia de los ecosistemas; detener la pérdida de biodiversidad y la degradación del suelo.
6. Intercambio regional de datos e información, y cooperación científica y en materia de conocimientos.

La cooperación y la gobernanza de las aguas transfronterizas se abordan en el Llamado a la Acción.

Por ejemplo, la Acción 5 pide a los países de la región del HKH que pongan en marcha programas sobre los ecosistemas de agua dulce, incluidas la criosfera y las cuencas hidrográficas, para mantener la calidad del agua y los caudales de los ríos de la región mediante la adopción de una gestión de las cuencas hidrográficas a escala transfronteriza. Los países de la región del HKH deben integrar los ecosistemas acuáticos y de agua dulce en las políticas y estrategias nacionales y subnacionales. Esto incluye evaluaciones de impacto ambiental y social en proyectos de desarrollo como los de energía hidroeléctrica, presas y carreteras. Además, aboga por incentivar los pagos por servicios ecosistémicos a las personas que protegen las zonas de captación de las centrales hidroeléctricas, y por el suministro de agua potable y el turismo. Y la Acción 6 pide que se generen y compartan datos sobre variables climáticas, incluidos los relativos al agua, la energía y la seguridad alimentaria, la biodiversidad y la pobreza en las montañas. Además, promueve de forma proactiva la cooperación entre los países ribereños en el intercambio abierto de datos sobre bienes y servicios públicos.

Fuente: adaptado de ICIMOD (2020) y Adaptation at Altitude (s.f.).

9.3 Gobernanza de las aguas de montaña a nivel nacional y local

(Balsiger et al., 2020). Identifica 12 zonas a través de ocho protocolos jurídicamente vinculantes²². Sin embargo, no existe un protocolo sobre el agua, cuya gestión es una dimensión transversal (Balsiger, 2007; Lackner y Psenner, 2007) de la que se encargan los gobiernos nacionales. La Secretaría del Convenio de los Alpes ayuda a los países miembros elaborando directrices sobre temas como los efectos del cambio climático en los recursos hídricos de los Alpes (Secretaría Permanente del Convenio de los Alpes, 2014). El convenio ha brindado oportunidades para acelerar la adopción de medidas de adaptación mediante la integración de las respuestas políticas de los países ribereños, el fomento de la creación de alianzas y el establecimiento de redes (Balsiger, 2007).

El **Convenio de los Cárpatos** se creó en 2003 para proteger la segunda cadena montañosa más grande de Europa (véase la sección 7.2.2). Involucra a Chequia, Eslovaquia, Hungría, Polonia, Rumanía, Serbia y Ucrania (Secretaría del Convenio de los Cárpatos, 2020). Es el único mecanismo de gobernanza multinivel para toda la zona de los Cárpatos, que proporciona un marco para la cooperación y la coordinación de políticas multisectoriales, una plataforma para estrategias conjuntas de desarrollo sostenible y un foro para el diálogo entre todas las partes interesadas (Climate-ADAPT, s.f.). El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente alberga la Secretaría del Convenio de los Cárpatos. El Grupo de Trabajo del Convenio de los Cárpatos promueve una visión a largo plazo para adaptarse al cambio climático. El artículo 6 del convenio se centra en la gestión sostenible e integrada de las cuencas fluviales. También hay un Grupo de Trabajo sobre adaptación que menciona la vulnerabilidad del agua y los ecosistemas al cambio climático en su mandato.

La gestión de las aguas de montaña se lleva a cabo principalmente dentro de las fronteras nacionales a través de la legislación, las políticas y las estrategias nacionales. La formulación e implementación de políticas se realiza dentro del contexto político-económico de cada país. En algunos casos, las políticas nacionales en materia de agua, agricultura, industria y energía se desarrollan para favorecer las regiones bajas de las cuencas hidrográficas, por ejemplo, para abastecer a zonas más pobladas. Con frecuencia, las políticas nacionales no reflejan plenamente los problemas sectoriales relacionados con el agua en las montañas; más bien, tienden a contemplar las montañas como fuentes para los usuarios que residen aguas abajo.

Las recomendaciones de los marcos internacionales y los acuerdos transfronterizos orientan el desarrollo de políticas y estrategias nacionales. Diversas consideraciones y enfoques se recomiendan universalmente para mejorar la gobernanza del agua en las montañas. Entre ellos se mencionan los siguientes factores: fortalecer la colaboración y aumentar el monitoreo, incluyendo la recopilación y el intercambio de datos; involucrar a los diversos conocimientos indígenas y locales; promover la igualdad de género; priorizar el desarrollo inclusivo y los enfoques de adaptación al clima para reducir la pobreza en las montañas; y establecer plataformas/mecanismos de resolución de conflictos y acuerdos de distribución de beneficios entre los países ribereños (Adler et al., 2022).

²² Ordenación territorial y desarrollo sostenible, agricultura de montaña, protección de la naturaleza y conservación del paisaje, bosques de montaña, turismo, energía, conservación del suelo y transporte.

● ● ●
La gestión de las aguas de montaña se lleva a cabo principalmente dentro de las fronteras nacionales a través de la legislación, las políticas y las estrategias nacionales

Los datos relativos a la región del HKH destaca que la implementación de políticas en los países solo mejorará si los gobiernos nacionales reconocen la naturaleza multisectorial e intersectorial de la gobernanza del agua. Dicho proceso depende de la participación de diversas partes interesadas, incluidas las comunidades indígenas y las mujeres, y del conocimiento local. Es necesario facilitar las interacciones aguas arriba y aguas abajo para mejorar la gobernanza a nivel territorial. A escala nacional, se recomienda fortalecer la participación de la comunidad y la descentralización, promover el involucramiento de más partes interesadas y abordar los desafíos relativos a la implementación de los procesos de gestión. Los gobiernos deben crear marcos regulatorios y acuerdos institucionales a nivel local que permitan la difusión de iniciativas exitosas para reforzar la acción de la comunidad y promover la creación de alianzas entre la comunidad y el gobierno (Wester et al., 2019).

Las regiones montañosas podrían obtener beneficios sustanciales si la gobernanza priorizara enfoques de desarrollo y adaptación más inclusivos. Estos incluyen una interacción respetuosa con la diversidad de conocimientos indígenas y los sistemas de conocimiento local de las montañas, y un esfuerzo sostenido para abordar las causas profundas de la vulnerabilidad. Esto requeriría: mejores actividades de coordinación y monitoreo; mecanismos de toma de decisiones más inclusivos, también para los pequeños agricultores, las mujeres, los pueblos indígenas y las jóvenes generaciones; y un aumento sustancial de la financiación para el desarrollo sostenible de las montañas. Estos facilitadores clave de la gobernanza constituyen una respuesta importante a los desafíos que enfrentan las regiones montañosas, especialmente en relación con las aguas de montaña.

Leyes de protección de los glaciares

Solo unos pocos países cuentan con leyes específicamente dedicadas a la protección o preservación de los glaciares. La Ley Nacional de Glaciares de Argentina (véase la sección 7.3.1), cuyo objetivo es prohibir la minería en áreas ocupadas por glaciares y permafrost, fue aprobada en 2010 y confirmada por la Corte Suprema de Argentina en 2018 (Taillant, 2019). En 2024, Tayikistán aprobó una ley que describe la base legal, económica y organizativa para la protección de los glaciares como objetos del medio ambiente y fuentes estratégicas de recursos hídricos (República de Tayikistán, 2024). Otros países como Chile (véase el cuadro 5.1) y Kirguistán han propuesto leyes similares que identifican los glaciares como áreas protegidas (Iribarren Anacona et al., 2018).

Dado que los glaciares son sistemas dinámicos, estos marcos legales pueden ser complejos y difíciles de adoptar y aplicar. Pueden incluir consideraciones sobre el suministro y la calidad del agua, así como medidas preventivas o de emergencia para abordar los riesgos relacionados con los glaciares, a la vez que equilibran diferentes perspectivas y necesidades para evitar conflictos sociales, ambientales y económicos.

9.4 Valoración y financiación

Si bien algunos de los bienes y servicios que proporcionan los entornos montañosos, como la madera, la energía hidroeléctrica y los minerales, pueden tener un valor económico medible (por ejemplo, costos de extracción versus ganancias), los beneficios y valores ambientales son mucho más difíciles de monetizar; el agua limpia, el aire y la biodiversidad son ejemplos clásicos en este sentido. Además, los recursos montañosos son inherentemente complejos y están interrelacionados, por lo que constituyen un producto conjunto y no varios elementos separados.

Examinar las pérdidas y los daños causados por los riesgos naturales también proporciona una perspectiva del valor general de las regiones montañosas (cuadro 9.3).

● ● ●
Los gobiernos nacionales son importantes fuentes de inversión, generalmente a través de instrumentos sectoriales como las políticas agrícolas e hídricas

Cuadro 9.3 Pérdidas económicas causadas por riesgos naturales en las montañas

Entre 1985 y 2014, los costos de daños económicos reportados en regiones montañosas por inundaciones y movimientos en masa (incluidos aquellos no vinculados directamente a la criosfera) fueron más altos en la región del Hindu Kush Himalaya (45 000 millones de dólares estadounidenses), seguida de los Alpes europeos (7 000 millones de dólares) y los Andes (3 000 millones de dólares; Stäubli et al., 2018). En Perú, el costo de la recesión de los glaciares para el sector energético se ha estimado en 740 millones de dólares anuales, con una reducción general del 11-15 % en la producción de electricidad (Vergara et al., 2007). De manera similar, se proyectó que Suiza, que utiliza energía hidroeléctrica para generar más de la mitad de la energía del país, perdería alrededor del 21 % de su entrada anual en el período 2031-2050 en comparación con 1991-2010, y se esperaba una reducción adicional en el potencial hidroeléctrico debido a la contracción de la criosfera (Gaudard et al., 2013).

Los registros de daños monetarios a menudo incluyen únicamente el valor de la infraestructura destruida y no evalúan el valor de las tierras agrícolas (Muhammad et al., 2021), ni los daños a largo plazo a las infraestructuras viales, sanitarias o educativas (Shrestha et al., 2023). El aumento de los riesgos climáticos, junto con la variación de la disponibilidad de agua de deshielo, ha afectado más a los pueblos indígenas y a las comunidades locales de montaña, que dependen del deshielo de los glaciares y la nieve para su sustento. Estas comunidades a menudo sufren pérdidas y daños no económicos o intangibles, como la pérdida de patrimonio cultural y paisajes sagrados, lo que también amenaza su capacidad de adaptación (Adler et al., 2022).

Fuente: adaptado de PNUMA (2023).

Disponibilidad de recursos financieros

Los gobiernos nacionales son importantes fuentes de inversión, generalmente a través de instrumentos sectoriales como las políticas agrícolas e hídricas. Diversos programas de cooperación territorial con un componente relacionado con las zonas de montaña también pueden proporcionar financiación. En los países en desarrollo, los donantes bilaterales y multilaterales pueden aportar financiación adicional (Balsiger et al., 2020).

La financiación para la adaptación y la inclusión y contribución del sector privado son factores clave para alcanzar el potencial de adaptación en las zonas de montaña (Mishra et al., 2019; PNUMA, 2023). Si bien existe una financiación sustancial disponible para invertir en el desarrollo sostenible de las regiones montañosas, el acceso a los principales programas de apoyo ha sido relativamente limitado. Esto indica que una importante opción de respuesta está infrautilizada (McDowell et al., 2020). Más específicamente, se deben movilizar fondos internacionales, regionales, nacionales y locales innovadores y asequibles para respaldar la planificación en materia de agua, agricultura y energía, así como las inversiones en infraestructura. Una mayor utilización del apoyo y la financiación disponibles podría ayudar a aliviar la carga de las comunidades y los países montañosos, para lo cual es necesario

fortalecer la capacidad de los actores para identificar los recursos, acceder a ellos y movilizarlos. Se han identificado algunos factores que fomentan la inversión financiera en las montañas (cuadro 9.4; Wymann von Dach et al., 2016).

Cuadro 9.4 Factores que incentivan la inversión financiera en las regiones montañosas

- Un entorno nacional propicio. Esto implica la existencia de una política nacional para las regiones montañosas, vinculada a la política nacional general de desarrollo, que pueda fomentar y coordinar la inversión pública.
- La seguridad es un requisito previo para la inversión. Esto se relaciona con la estabilidad política, así como con un liderazgo confiable, el estado de derecho y el acceso seguro a recursos como tierras, crédito, ahorros y seguros para los inversores a nivel local, nacional e internacional.
- La inversión debería ser preferiblemente descentralizada, con énfasis en las pequeñas y medianas empresas. Las razones son la dispersión de los asentamientos, la topografía irregular y la baja densidad de población en muchas zonas montañosas, en comparación con las tierras bajas. Las localidades pequeñas y medianas ofrecen oportunidades para implementar estos principios de inversión.
- La descentralización política y fiscal es importante para considerar la gran diversidad, a menudo en distancias cortas, del medio ambiente, la sociedad y la cultura. Implica delegar poder, competencias y financiación a organismos subnacionales y locales.
- La colaboración transfronteriza genera oportunidades de inversión, ya que las regiones montañosas a menudo trascienden las fronteras nacionales. Dichas oportunidades incluyen la inversión en infraestructura de tránsito, infraestructura de gestión hídrica transfronteriza y estrategias de reducción del riesgo de desastres. Los organismos y autoridades de cuencas hidrográficas transfronterizas podrían facilitar o acoger los procesos de planificación conjunta de inversiones de los estados ribereños, optimizando así mecanismos de financiación combinada innovadores y eficientes.
- Conocimiento e investigación. El conocimiento local y científico, así como el desarrollo de capacidades, son importantes para adaptar la inversión a condiciones naturales y culturales específicas. El seguimiento de los resultados de la inversión es fundamental para ilustrar los beneficios para las comunidades y los ecosistemas de montaña, así como para los inversores, y así atraer más inversión para el desarrollo sostenible de las zonas de montaña en el futuro.

Fuente: adaptado de Wymann von Dach et al. (2016, p. 67).

El desarrollo en las zonas montañosas suele ser más costoso y complicado que en las tierras bajas debido a la topografía accidentada y la difícil accesibilidad, las restricciones a las economías de escala, la gran distancia a los puertos marítimos y centros económicos, y el escaso desarrollo de los sectores industrial y de servicios. Los costos relacionados con el transporte, la infraestructura, los bienes y los servicios aumentan con la altitud y el aislamiento. Esto debe tenerse en cuenta en el marco de las políticas y la financiación, y se requiere la inclusión de políticas y programas específicos para las zonas de montaña en los planes de desarrollo nacionales y globales.



El desarrollo en las zonas montañosas suele ser más costoso y complicado que en las tierras bajas

Si bien la importancia de los servicios ecosistémicos (véase el capítulo 6) que brindan las montañas es ampliamente reconocida, quienes contribuyen a la sostenibilidad de estos recursos rara vez reciben compensación. Las políticas e inversiones serán más sostenibles si promueven la distribución equitativa de los beneficios derivados del desarrollo de las aguas de montaña entre sus habitantes. Las aguas de montaña ofrecen un amplio margen para el desarrollo de mecanismos de inversión y compensación que permitan salvaguardar los ecosistemas montañosos y mejorar sus medios de vida. Esto podría lograrse, por ejemplo, mediante la financiación participativa para la gestión de cuencas hidrográficas y la distribución directa de beneficios (por ejemplo, compartir los flujos de ingresos derivados de la generación de energía hidroeléctrica con las personas que viven en las proximidades de las centrales).

Los vínculos productivos y las condiciones comerciales entre las tierras altas y las tierras bajas tienden a ser asimétricos, favoreciendo a las tierras bajas. Las industrias extractivas, como la minería, la generación de energía hidroeléctrica y la extracción de madera, tienden a ser poco beneficiosas para la población de las montañas. Centrarse en planes de inversión conjunta que abarquen múltiples sectores —como la energía, la agricultura, la pesca, el agua potable, el transporte y los servicios ecosistémicos— puede ofrecer interesantes perfiles de riesgo-retorno. Los planes de inversión conjunta integrados también pueden ayudar a reducir la probabilidad de conflicto al crear un entendimiento común de los intereses sectoriales, políticos y generacionales en función de la disponibilidad de agua actual y futura, lo que ofrece interesantes oportunidades de reducción de riesgos para los inversores (FNUDC, 2021).

Referencias

- Adaptation at Altitude. s.f. Hindu Kush Himalaya. Sitio web de Adaptation at Altitude. mountains-connect.org/mountain-range-hindu-kush-himalaya/.
- Adler, C., Wester, P., Bhatt, I., Huggel, C., Insarov, G. E., Morecroft, M. D., Muccione, V. y Prakash, A. 2022. Mountains. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösckhe, V. Möller, A. Okem y B. Rama (eds), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribución del Grupo de Trabajo II al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge, Reino Unido/Nueva York, Cambridge University Press, pp. 2273-2318. doi.org/10.1017/9781009325844.022.
- Asamblea General de las Naciones Unidas. 2008. Desarrollo sostenible de las regiones montañosas. Resolución aprobada por la Asamblea General el 19 de diciembre de 2007. Sexagésimo segundo período de sesiones, A/RES/62/196. docs.un.org/es/A/RES/62/196.
- . 2012. El futuro que queremos. Resolución aprobada por la Asamblea General el 27 de julio de 2012. Sexagésimo sexto período de sesiones, A/RES/66/288. docs.un.org/es/A/RES/66/288.
- . 2015a. Marco de Sendái para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030. Resolución aprobada por la Asamblea General el 3 de junio de 2015. Sexagésimo noveno período de sesiones, A/RES/69/283. docs.un.org/es/A/RES/69/283.
- . 2015b. Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Resolución aprobada por la Asamblea General el 25 de septiembre de 2015. Septuagésimo período de sesiones, A/RES/70/1. docs.un.org/es/A/res/70/1.
- Balsiger, J. 2007. Regionalism Reconsidered: The Alpine Convention as a Model of Earth System Governance. Artículo presentado en la Conferencia de Ámsterdam sobre las Dimensiones Humanas del Cambio Ambiental Global 2007, 24-26 de mayo de 2007.
- Balsiger, J., Dupuits, E. y Scolobig, A. 2020. *International Experience in Transboundary Mountain Governance: Insights for Andean Cooperation*. Ginebra, Instituto de Gobernanza Medioambiental y Desarrollo Territorial, Universidad de Ginebra. archive-ouverte.unige.ch/unige:145756.
- Climate-ADAPT. s.f. Carpathian Convention. Sitio web de Climate-ADAPT. climate-adapt.eea.europa.eu/metadata/organisations/carpathian-convention.
- CMNUCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático). 2015. *Acuerdo de París*. Naciones Unidas. unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_spanish_.pdf.
- CNUMAD (Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo). 1992. Managing fragile ecosystems: Sustainable Mountain development. *Agenda 21*. CNUMAD, Río de Janeiro, Brasil. sustainabledevelopment.un.org/content/documents/Agenda21.pdf.
- Dinar, S., Katz, D., De Stefano, L. y Blankespoor, B. 2016. Climate Change and Water Variability: Do Water Treaties Contribute to River Basin Resilience? Policy Research Working Paper No. 7855. Washington DC, Grupo del Banco Mundial. documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/209901476193940390/climate-change-and-water-variability-do-water-treaties-contribute-to-river-basin-resilience.
- FNUDC (Fondo de las Naciones Unidas para el Desarrollo de la Capitalización). 2021. *Blue Peace Financing Initiative: Solving Local Water and Sanitation Challenges Through Cooperation and Sustainable Financing*. FNUDC. www.uncdf.org/article/7569/blue-peace-financing-initiative-solving-local-water-and-sanitation-challenges-through-cooperation-and-sustainable-financing.
- Gaudard, L., Gilli, M. y Romero, F. 2013. Climate change impacts on hydropower management. *Water Resources Management*, Vol. 27, pp. 5143-5156. doi.org/10.1007/s11269-013-0458-1.
- Hayat, S., Gupta, J., Vegelin, C. y Jamali, H. 2022. A review of hydro-hegemony and transboundary water governance. *Water Policy*, Vol. 24, No. 11, pp. 1723-1740. doi.org/10.2166/wp.2022.256.
- Hock, R., Rasul, G., Adler, C., Cáceres, B., Gruber, S., Hirabayashi, Y., Jackson, M., Käb, A., Kang, S., Kutuzov, S., Milner, A., Molau, U., Morin, S., Orlove, B. y Steltzer, H. 2019. *High mountain areas*. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama y N. M. Weyer (eds), *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Reino Unido/Nueva York, Cambridge University Press, pp. 131-202. doi.org/10.1017/9781009157964.004.
- ICIMOD (Centro Internacional para la Ordenación Integrada de las Montañas). 2020. *The HKH Call to Action to Sustain Mountain Environments and Improve Livelihoods in the Hindu Kush Himalaya*. Katmandú, ICIMOD. doi.org/10.53055/ICIMOD.1.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2019. Annex I: Glossary [Weyer, N. M. (ed.)]. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama y N. M. Weyer (eds), *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Reino Unido/Nueva York, Cambridge University Press, pp. 677-702. doi.org/10.1017/9781009157964.015.
- Iribarren Anacona, P., Kinney, J., Schaefer, M., Harrison, S., Wilson, R., Segovia, A., Mazzorana, B., Guerra, F., Fariás, D., Reynolds, J. M. y Glasser, N. F. 2018. Glacier protection laws: Potential conflicts in managing glacial hazards and adapting to climate change. *Ambio*, Vol. 47, pp. 835-845. doi.org/10.1007/s13280-018-1043-x.
- Kliot, N., Shmueli, D. y Shamir, U. 2001. Institutions for management of transboundary water resources: Their nature, characteristics and shortcomings. *Water Policy*, Vol. 3, No. 3, pp. 229-255. doi.org/10.1016/S1366-7017(01)00008-3.
- Lackner, R. y Psenner, R. 2007. *The Water Balance of the Alps: What do we need to Protect the Water Resources of the Alps?* Actas de la Conferencia celebrada en la Universidad de Innsbruck, 28-29 de septiembre de 2006. Innsbruck University Press. doi.org/10.26530/OAPEN_503830.
- McDowell, G., Harris, L., Koppes, M., Price, M. F., Chan, K. M. A. y Lama, D. G. 2020. From needs to actions: Prospects for planned adaptations in high mountain communities. *Climatic Change*, Vol. 163, pp. 953-972. doi.org/10.1007/s10584-020-02920-1.
- Mishra, A., Appadurai, A. N., Choudhury, D., Regmi, B. R., Kelkar, U., Alam, M., Chaudhary, P., Mu, S. S., Ahmed, A. U., Lotia, H., Fu, C., Namgyel, T. y Sharma, U. 2019. Adaptation to climate change in the Hindu Kush Himalaya: Stronger action urgently needed. P. Wester, A. Mishra y A. B. Shrestha (eds), *The Hindu Kush Himalaya Assessment: Mountains, Climate Change, Sustainability and People*. Cham, Suiza, Springer, pp. 457-490. doi.org/10.1007/978-3-319-92288-1_13.
- Molden, D., Hurni, H., Zimmermann, A. y Wymann von Dach, S. 2013. Focus issue: Water governance in mountains. *Mountain Research and Development*, Vol. 33, No. 3, pp. 193-194. doi.org/10.1659/mrd.3303.
- Muhammad, S., Li, J., Steiner, J. F., Shrestha, F., Shah, G. M., Berthier, E., Guo, L., Wu, L.-X. y Tian, L. 2021. A holistic view of Shisper Glacier surge and outburst floods: From physical processes to downstream impacts. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, Vol. 12, No. 1, pp. 2755-2775. doi.org/10.1080/19475705.2021.1975833.
- PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). 2023. *Underfinanced. Underprepared. Inadequate Investment and Planning on Climate Adaptation Leaves World Exposed*. Adaptation Gap Report 2023. Nairobi, PNUMA. doi.org/10.59117/20.500.11822/43796.

- República de Tayikistán. 2024. Закон Республики Таджикистан о защите ледников [Ley de la República de Tayikistán sobre la protección de los glaciares]. No. 2026. Dusanbé. faolex.fao.org/docs/pdf/taj224299.pdf (en ruso).
- Romeo, R., Manuelli, S. y Abear, S. 2022. The International Year of Sustainable Mountain Development 2022: An opportunity to promote action for mountains. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, Vol. 6, No. 933080. doi.org/10.3389/fsufs.2022.933080.
- Secretaría del Convenio de los Cárpatos. 2020. Long-Term Vision 2030 Towards Combating Climate Change in the Carpathians. Grupo de Trabajo sobre el Cambio Climático de la Secretaría del Convenio de los Cárpatos. Sexta reunión de la Conferencia de las Partes del Convenio Marco sobre la Protección y el Desarrollo Sostenible de los Cárpatos. www.carpathianconvention.org/tl_files/carpathiancon/Downloads/03%20Meetings%20and%20Events/COP/2020_COP6_Online/official%20documents/CC%20COP6%20DOC10_Long_Term_Vision_2030_FINAL%20DRAFT.pdf.
- Secretaría Permanente del Convenio de los Alpes. 2014. Framework Convention: Guiding principles for sustainable life in the Alps. Sitio web del Convenio de los Alpes. www.alpconv.org/en/home/convention/framework-convention/.
- Shrestha, F., Steiner, J. F., Shrestha, R., Dhungel, Y., Joshi, S. P., Inglis, S., Ashraf, A., Wali, S., Walizada, K. M. y Zhang, T. 2023. A comprehensive and version-controlled database of glacial lake outburst floods in High Mountain Asia. *Earth System Science Data*, Vol. 15, No. 9, pp. 3941-3961. doi.org/10.5194/essd-15-3941-2023.
- Stäubli, A., Nussbaumer, S. U., Allen, S. K., Huggel, C., Arguello, M., Costa, F., Hergarten, C., Martínez, R., Soto, J., Vargas, R., Zambrano, E. y Zimmermann, M. 2018. Analysis of weather- and climate-related disasters in mountain regions using different disaster databases. S. Mal, R. B. Singh y C. Huggel (eds), *Climate Change, Extreme Events and Disaster Risk Reduction: Towards Sustainable Development Goals*. Sustainable Development Goals Series. Cham, Suiza, Springer, pp. 17-41. doi.org/10.1007/978-3-319-56469-2_2.
- Taillant, J. D. 2019. Argentine Supreme Court Upholds Glacier Law. Sitio web del Centro de Derechos Humanos y Ambiente. center-hre.org/argentine-supreme-court-upholds-glacier-law/.
- Vergara, W., Deeb, A., Valencia, A., Bradley, R., Francou, B., Zarzar, A., Grünwaldt, A. y Haeussling, S. 2007. Economic impacts of rapid glacier retreat in the Andes. *EOS*, Vol. 88, No. 25, pp. 261-264. doi.org/10.1029/2007EO250001.
- Wester, P., Mishra, A., Mukherji, A. y Shrestha, A. B. (eds). 2019. *The Hindu Kush Himalaya Assessment: Mountains, Climate Change, Sustainability and People*. Cham, Suiza, Springer. lib.icimod.org/record/34383.
- Wymann von Dach, S., Bachmann, F., Borsdorf, A., Kohler, T., Jurek, M. y Sharma, E. 2016. *Investing in Sustainable Mountain Development: Opportunities, Resources and Benefits*. Sustainable Mountain Development Series. Berna, Centro para el Desarrollo y el Medio Ambiente (CDE)/Universidad de Berna/Bern Open Publishing (BOP). www.carpathianconvention.org/tl_files/carpathiancon/Downloads/04%20Publications%20-%20Press%20-%20Gallery/Documents%20and%20Publications/CDE_2016_Investing%20in%20Sustainable%20Mountain%20Development.pdf.

Capítulo 10

Conclusiones

WWAP de la UNESCO
Richard Connor

Porqué las montañas son importantes para todos

● ● ●
Las regiones montañosas suelen recibir mucha menos atención que otras partes del mundo y casi no se mencionan en las agendas políticas globales

Las montañas, que cubren casi una cuarta parte de la superficie terrestre, proporcionan entre el 55 % y el 60 % del caudal anual de agua dulce del planeta. Como “torres de agua” del mundo, son una fuente vital de agua dulce para miles de millones de personas, tanto en las montañas como río abajo. También suministran otros recursos naturales, bienes y servicios esenciales, a menudo únicos, utilizados en todo el mundo. A pesar de su importancia fundamental, las regiones montañosas suelen recibir mucha menos atención que otras partes del mundo y casi no se mencionan en las agendas políticas globales. Como punto de intersección de las crisis relacionadas con el agua, el clima y la biodiversidad, su papel crucial en el marco del desarrollo sostenible es innegable.

Las principales actividades económicas en las regiones montañosas son la agricultura, el pastoreo, la silvicultura, el turismo, la minería, el comercio transfronterizo y la producción de energía. Las montañas proporcionan productos de alto valor, como plantas medicinales, madera y otros productos forestales, ganado de montaña único y especialidades agrícolas. Son focos globales de agrobiodiversidad, ya que las montañas albergan gran parte de las reservas genéticas mundiales de las plantas de cultivo y medicinales.

Como consecuencia del cambio climático, las regiones montañosas se están calentando rápidamente, lo que afecta el ciclo hidrológico de formas sin precedentes y, en muchos casos, impredecibles. Si bien el ritmo acelerado de deshielo de los glaciares alpinos ha recibido una atención considerable y merecida, es la capa de nieve estacional, y no los glaciares, la principal fuente de escorrentía en la mayoría de las zonas de alta montaña. Sin embargo, la importancia relativa y las contribuciones del deshielo de la nieve, el hielo y el suelo congelado a la disponibilidad y calidad de los recursos hídricos aguas abajo suelen ser poco comprendidas y mal descritas (véase el capítulo 2).

Las consecuencias del cambio climático, como el aumento de las temperaturas, la recesión de los glaciares, el deshielo del permafrost y la alteración de los patrones de precipitación, pueden aumentar el riesgo de desastres naturales como deslizamientos de tierra, inundaciones y flujos de detritos. La superficie total y el número de lagos glaciares han aumentado significativamente desde la década de 1990, a medida que los glaciares han retrocedido. En las próximas décadas se formarán más lagos de este tipo, creando nuevos focos de inundaciones por desbordamiento repentino de lagos glaciares potencialmente peligrosos.

Las prácticas insostenibles de uso de la tierra, desde la deforestación hasta la rápida expansión de pueblos y ciudades, así como la contaminación provocada por actividades humanas como la minería, amenazan el equilibrio hidrológico de estas frágiles regiones, sus ecosistemas, las formas de vida que albergan y los medios de subsistencia que sustentan desde la fuente hasta el mar.

Más de mil millones de personas (alrededor del 15 % de la población mundial) residen en regiones montañosas, la mayoría (90 %) en países en desarrollo. Aproximadamente dos tercios de la población mundial de montaña vive en pueblos y ciudades. La orografía accidentada, la mayor exposición a riesgos naturales y los mayores costos en las regiones montañosas dificultan el desarrollo y el mantenimiento de redes de abastecimiento de agua y drenaje, plantas de tratamiento de agua y la protección de fuentes en estas zonas de rápida urbanización (véase el capítulo 4).

Hasta la mitad de la población de zonas rurales de montaña en países en desarrollo padece inseguridad alimentaria, siendo las mujeres y los niños quienes corren mayor riesgo (véase el capítulo 3). Entre los factores que contribuyen a la inseguridad alimentaria se incluyen el aislamiento y la inaccesibilidad (por ejemplo, la distancia a las carreteras y los mercados de alimentos), las temporadas de cultivo más cortas, las grandes variaciones en el suministro estacional de agua para la agricultura y los bajos niveles de mecanización.



Los tratados y convenios son facilitadores relevantes para promover estrategias de cooperación y su implementación en las regiones montañosas

Estrategias de respuesta: el camino a seguir

Las industrias que dependen del agua se han desarrollado en zonas montañosas donde el agua y otros recursos son relativamente abundantes (véase el capítulo 5). Además de la producción de energía (por ejemplo, la energía hidroeléctrica), el agua también es necesaria para la extracción y el procesamiento de minerales, la producción de madera y el desarrollo del turismo. Las zonas montañosas remotas pueden ser difíciles de regular, lo que resulta en extracciones y vertidos descontrolados de agua, y también en la liberación de contaminantes industriales que pueden afectar la calidad del agua para las comunidades de las montañas y río abajo.

Los servicios ecosistémicos relacionados con el agua que proporcionan las montañas incluyen el almacenamiento de agua y la regulación de inundaciones, así como la protección contra la erosión y los deslizamientos de tierra. Las montañas presentan una amplia gama de zonas ecológicas y, a menudo, poseen una mayor biodiversidad endémica que las tierras bajas, incluyendo importantes variedades genéticas de cultivos agrícolas y animales (véase el capítulo 6). Más que los impactos directos de los cambios de temperatura, serán las variaciones hidrológicas las que determinarán cómo cambian la mayoría de los ecosistemas montañosos.

El agua desempeña un papel fundamental en la **adaptación al cambio climático** en las zonas montañosas. La mayoría de las iniciativas de adaptación documentadas en las regiones montañosas abordan aspectos relacionados con el agua (por ejemplo, la variabilidad de las precipitaciones y los fenómenos extremos, como sequías, inundaciones y variaciones en la disponibilidad de agua) mediante medidas como el desarrollo de **sistemas de alerta temprana**. El agua también desempeña un papel importante con respecto a la adaptación en otros sectores, como la agricultura, la reducción del riesgo de desastres, el turismo y las actividades recreativas.

Dado que aproximadamente el 30 % de los bosques del mundo se encuentran en regiones montañosas, el potencial de almacenamiento y captura de carbono es considerable. Sin embargo, con la excepción de la protección forestal y la reforestación para el almacenamiento de carbono, las oportunidades de **mitigación del cambio climático**, incluso mediante el uso y el cambio del suelo, suelen ser limitadas.

Las iniciativas de **conservación del agua** en las regiones montañosas, que incluyen la restauración y protección de zonas especialmente vulnerables (por ejemplo, los humedales), la gestión de cuencas hidrográficas y el uso racional del agua, son medidas de adaptación robustas y de bajo riesgo. También se han intentado iniciativas para generar hielo en invierno mediante la creación de nieve artificial y la construcción de estupas de hielo para aumentar los flujos de agua de deshielo temprano en primavera, con cierto éxito a pequeña escala y a nivel local.

Para **reducir los riesgos relacionados con el agua** en las zonas montañosas será necesario abordar las causas profundas de la vulnerabilidad, como la pobreza, la marginación y las desigualdades de género. Reconocer y respetar las múltiples culturas y la diversidad de los **conocimientos indígenas y locales** de las montañas, que constituyen la base de la capacidad de adaptación de las comunidades, puede sentar bases sólidas para desarrollar estrategias integradas de adaptación y mitigación específicas para cada lugar. Las estructuras y procesos de gobernanza inclusivos, incluyendo el diseño y la implementación de políticas y medidas, pueden contribuir al desarrollo de dichas capacidades.

La creciente presión sobre los recursos hídricos derivada del desarrollo socioeconómico, sumada a los cambios en la disponibilidad estacional de agua, de la estación cálida a la fría, incrementará la complejidad de la **gobernanza del agua**. Las mejoras en la gestión de las cuencas hidrográficas requieren más que infraestructura adicional construida por el ser humano.

● ● ●
Los costos relacionados con el transporte, la infraestructura, los bienes y los servicios aumentan con la altitud y el aislamiento

Los **marcos de políticas internacionales** ofrecen un apoyo prometedor a la gobernanza del agua y la adaptación al cambio climático en las zonas de montaña, a la vez que abordan el desarrollo sostenible. La evidencia sugiere que los tratados y convenios son facilitadores relevantes para promover estrategias de cooperación y su implementación en las regiones montañosas.

La importancia de las montañas como cabeceras y fuentes de agua para las zonas aguas abajo, a menudo densamente pobladas, fue reconocida por la Asamblea General de las Naciones Unidas en 2008, con la adopción de la Resolución 62/196 sobre el desarrollo sostenible de las montañas. La gobernanza del agua en las montañas suele equipararse con la protección de las fuentes y la gestión de cuencas hidrográficas, lo que beneficia a los usuarios aguas abajo. Por lo tanto, gobernar y gestionar (así como financiar) las regiones montañosas de forma sostenible redundará en beneficio de todos.

Dado que la mayoría de los grandes ríos nacen en zonas montañosas y con frecuencia son compartidos entre varios países, una **gobernanza de las aguas transfronterizas** basada en una perspectiva a nivel de cuenca que considera cuidadosamente las aguas de montaña puede brindar importantes beneficios a los países ribereños. La **cooperación regional** entre países para fomentar la gobernanza a nivel transfronterizo de paisajes y cuencas hidrográficas es un mecanismo importante para impulsar el desarrollo sostenible en las zonas montañosas, especialmente dado que muchas cordilleras y servicios ecosistémicos de montaña son de naturaleza transfronteriza. Los tratados o acuerdos pueden fortalecer la cooperación mediante el intercambio de datos e información, ayudar a subsanar las deficiencias en la capacidad técnica humana e institucional, y promover y fomentar el diálogo y la diplomacia.

Las recomendaciones de los marcos internacionales y los acuerdos transfronterizos orientan el desarrollo de políticas y estrategias nacionales. Sin embargo, la gestión de las aguas de montaña se lleva a cabo principalmente dentro de las fronteras nacionales, a través de **legislación, políticas y estrategias nacionales**. La formulación e implementación de políticas se desarrollan dentro del contexto político-económico de un país. En algunos casos, las políticas nacionales de agua, agricultura, industria y energía se desarrollan para favorecer las regiones bajas de las cuencas hidrográficas (por ejemplo, para abastecer a zonas más pobladas). Con frecuencia, las políticas nacionales no reflejan plenamente los retos que el sector hídrico tiene que enfrentar en las zonas montañosas; más bien, tienden a centrarse en las montañas como fuentes para los usuarios aguas abajo.

Si bien existe la posibilidad de disponer de fondos sustanciales para **inversiones** en desarrollo sostenible en las regiones montañosas, el acceso a los principales programas de apoyo ha sido relativamente limitado, lo que indica que una importante opción de respuesta está infrautilizada. Una mayor utilización del **apoyo y la financiación** disponibles podría ayudar a aliviar la carga de las comunidades y los países de montaña, para los cuales es necesario fortalecer la capacidad y la habilidad de los actores para identificar los recursos, acceder a ellos y movilizarlos.

En general, el desarrollo en las zonas montañosas es más costoso y difícil que en las tierras bajas debido a la topografía accidentada y la difícil accesibilidad, las restricciones a las economías de escala, la gran distancia a los puertos marítimos y centros económicos, y el escaso desarrollo de los sectores industrial y de servicios. Los costos relacionados con el transporte, la infraestructura, los bienes y los servicios aumentan con la altitud y el aislamiento. Es necesario tener esto en cuenta en las **políticas y las estrategias de financiación**, promoviendo la elaboración de políticas y programas específicos para las montañas en el marco de los planes de desarrollo a nivel nacional y mundial.

Comprender las características hidrológicas de las montañas y el papel de la criosfera es fundamental para promover el desarrollo sostenible y la planificación, así como para fomentar acciones anticipatorias ante los cambios sustanciales en curso. Sin embargo, muchas regiones montañosas están mal monitoreadas, incluso en parámetros básicos como la temperatura y la precipitación. Además, la mayoría de las estaciones de monitoreo se ubican en valles de menor altitud, lo que proporciona una visión limitada de la situación climática de las zonas altas.

La falta de **datos, monitoreo e investigación a largo plazo** sobre la criosfera de las montañas, y en general sobre las aguas de montaña, dificulta la adopción de medidas eficaces. Se trata de áreas clave para la **inversión en conocimiento y desarrollo de capacidades a largo plazo**. En un mundo donde el agua es cada vez más escasa, mejorar el conocimiento de los recursos hídricos de montaña presentes y futuros es fundamental. Esto exige inversiones sostenidas en costosas estaciones de monitoreo a largo plazo de glaciares y clima en zonas de gran altitud, así como en **la integración de la ciencia en todas las disciplinas**, para comprender mejor las dinámicas de las aguas y las sociedades de montaña. El acceso pleno y abierto a todos los datos sobre el agua también sería deseable.

Epílogo

Las montañas suministran agua dulce vital para miles de millones de personas e innumerables ecosistemas. Al ser las torres de agua del mundo, no se puede ignorar el papel crítico que desempeñan con respecto al desarrollo sostenible.

Se han de emprender acciones para comprender mejor y proteger estos entornos frágiles, que se ven crecientemente amenazados por el cambio climático y actividades humanas insostenibles.

Porque nada de lo que sucede en las montañas se queda en las montañas.

De una forma u otra, ***todos vivimos a los pies de una montaña.***

Abreviaturas y acrónimos

ABE	Adaptación basada en ecosistemas
AOD	Ayuda oficial al desarrollo
CDN	Contribución determinada a nivel nacional
CREA	Centro de Investigación sobre Ecosistemas de Altura
EAN	Equivalente en agua de la nieve
GIRH	Gestión integrada de los recursos hídricos
HKH	Hindu Kush Himalaya
INARCH	Red Internacional para la Hidrología de Cuencas Alpinas de Investigación
m s.n.m.	Metros sobre el nivel del mar
NDT	Neutralización de la degradación de las tierras
ODS	Objetivo de Desarrollo Sostenible
PNAD	Plan nacional de adaptación
PSH	Energía hidroeléctrica de almacenamiento por bombeo
ROS	Lluvia sobre nieve
RRD	Reducción del riesgo de desastres
SAT	Sistema de alerta temprana
SBN	Soluciones basadas en la naturaleza
SIPAM	Sistemas Importantes del Patrimonio Agrícola Mundial
SPG	Sistema de Garantía Participativa
TPRCC-Network	Red de Centros Regionales sobre el Clima del Tercer Polo
WASH	Agua, Saneamiento e Higiene



INFORME MUNDIAL DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL DESARROLLO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS



ISBN 978-92-3-3002296

© UNESCO 2024

196 páginas

Precio: EUR 55,00

WWDR 2024 A color, con cuadros, figuras, mapas, tablas, notas, fotografías, referencias y lista de abreviaturas y acrónimos, incluyendo los prefacios de la Directora General de la UNESCO, Audrey Azoulay, y del Presidente de ONU-Agua y del FIDA, Álvaro Lario.



ISBN 978-92-3-300257-9

© UNESCO 2025

196 páginas

Precio: EUR 55,00

WWDR 2025 A color, con cuadros, figuras, mapas, tablas, notas, fotografías, referencias y lista de abreviaturas y acrónimos, incluyendo los prefacios de la Directora General de la UNESCO, Audrey Azoulay, y del Presidente de ONU-Agua y del FIDA, Álvaro Lario.

Para descargar el formato PDF del informe y las publicaciones asociadas, ediciones anteriores del WWDR y el material para los medios de comunicación, visite: en.unesco.org/wwap.

PUBLICACIONES ASOCIADAS



Resumen ejecutivo del WWDR 2024

12 páginas

Disponible en alemán, árabe, chino, coreano, español, francés, hindi, inglés, italiano, portugués y ruso.



Datos, cifras y ejemplos de acción del WWDR 2024

24 páginas

Disponible en español, francés, inglés, italiano y portugués.



Resumen ejecutivo del WWDR 2025

12 páginas

Disponible en alemán, árabe, chino, coreano, español, francés, hindi, inglés, italiano, portugués y ruso.



Datos y cifras del WWDR 2025

12 páginas

Disponible en español, francés, inglés, italiano y portugués.

Para descargar estos documentos, visite: en.unesco.org/wwap.

INFORMES DE ONU-AGUA Y OTRAS PUBLICACIONES PERTINENTES

ONU-Agua coordina los esfuerzos de las entidades de las Naciones Unidas y las organizaciones internacionales que trabajan en temas relacionados con el agua y el saneamiento. Con ello, ONU-Agua pretende aumentar la eficacia del apoyo prestado a los Estados Miembros en sus esfuerzos por alcanzar acuerdos internacionales sobre agua y saneamiento. Las publicaciones de ONU-Agua se basan en la experiencia y los conocimientos de sus miembros y asociados.

Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos

El *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos* (WWDR) es el principal informe de ONU-Agua sobre cuestiones relacionadas con el agua y el saneamiento, y se centra en un tema diferente cada año. El informe es publicado por la UNESCO en nombre de ONU-Agua, y su producción está coordinada por el Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos. El informe ofrece una visión de las principales tendencias relativas al estado, uso y gestión del agua dulce y el saneamiento, basándose en el trabajo realizado por los miembros y socios de ONU-Agua. El informe, presentado con motivo del Día Mundial del Agua, proporciona a las personas responsables de la toma de decisiones conocimientos y herramientas para formular y aplicar políticas sostenibles en materia de agua. También ofrece las mejores prácticas y análisis en profundidad para estimular ideas y acciones para una mejor gestión en el sector del agua y en otros sectores relacionados.

Estrategia del sistema de las Naciones Unidas para el agua y el saneamiento

En respuesta a la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Agua 2023, la resolución A/RES/77/334 de la Asamblea General "*solicita al Secretario General que presente una estrategia para todo el sistema de las Naciones Unidas en materia de agua y saneamiento, en consulta con los Estados Miembros, antes de que finalice el septuagésimo octavo período de sesiones de la Asamblea General*". El objetivo de la estrategia es mejorar la coordinación y la ejecución de las prioridades relacionadas con el agua en todo el sistema de las Naciones Unidas, lo que se traduce en un apoyo más estratégico, eficaz, coherente y eficiente a los Estados Miembros en sus esfuerzos por acelerar el progreso en los planes y prioridades nacionales, los objetivos y metas acordados internacionalmente en relación con el agua y las soluciones transformadoras a los desafíos actuales y futuros relacionados con el agua. La estrategia se lanzó en julio de 2024 en el Foro Político de Alto Nivel sobre Desarrollo Sostenible en Nueva York.

Análisis y Evaluación Mundiales del Saneamiento y el Agua Potable de ONU-Agua (GLAAS)

El informe GLAAS es elaborado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en nombre de ONU-Agua. Proporciona una actualización mundial de los marcos políticos, los acuerdos institucionales, la base de recursos humanos y las fuentes de financiación internacionales y nacionales en apoyo del agua y el saneamiento. Constituye una aportación sustantiva a las actividades de Saneamiento y Agua para Todos, así como a los informes de progreso sobre el Objetivo de Desarrollo Sostenible 6.

Informes sobre los Progresos del Programa Conjunto OMS/UNICEF de Monitoreo del Abastecimiento de Agua, el Saneamiento y la Higiene (PCM)

El PCM está afiliado a ONU-Agua y es responsable del seguimiento mundial de los avances hacia el logro de las metas del ODS 6 para el acceso universal al agua potable segura y asequible, y a servicios de saneamiento e higiene adecuados y equitativos. Cada dos años, el PCM publica estimaciones e informes actualizados sobre el progreso realizado con respecto al agua, el saneamiento y la higiene en los hogares (como parte de los informes de progreso sobre el ODS 6), las escuelas y los centros de salud.

Casos prácticos de aceleración por países de ONU-Agua

Para acelerar el logro de las metas del ODS 6 como parte del Marco Mundial de Aceleración del ODS 6, ONU-Agua publica Estudios de caso nacionales que examinan los caminos seguidos por cada país para acelerar el progreso hacia el logro del ODS 6 a nivel nacional. Los estudios de caso documentan buenas prácticas replicables para alcanzar las metas del ODS 6, así como examinar cómo se puede acelerar el progreso a través de las metas del ODS 6 en un país. Desde 2022, se han publicado nueve estudios de caso del Brasil, Camboya, Costa Rica, Chequia, Ghana, Jordania, el Pakistán, el Senegal, y Singapur. Está previsto que en julio de 2025 se publiquen tres nuevos estudios de la Arabia Saudita, Bhután y Rwanda.

Resúmenes de políticas y análisis

Los informes de políticas de ONU-Agua ofrecen orientaciones breves e informativas sobre las cuestiones más apremiantes relacionadas con el agua dulce que aprovechan la experiencia combinada del sistema de las Naciones Unidas. Los informes analíticos ofrecen un análisis de las cuestiones emergentes y pueden servir de base para futuras investigaciones, debates y orientaciones políticas.

PUBLICACIONES PREVISTAS DE ONU-AGUA

- Informe de políticas de ONU-Agua sobre aguas transfronterizas (actualización)
- Informe analítico de ONU-Agua sobre innovación en materia de agua
- Informe de política de ONU-Agua sobre cambio climático, medio ambiente y derechos humanos

DÍA MUNDIAL DEL AGUA E INFORME MUNDIAL DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL DESARROLLO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Las Naciones Unidas designan días, semanas, años y decenios específicos como ocasiones para señalar acontecimientos o temas particulares con el fin de promover, mediante la concienciación y la acción, los objetivos de la Organización.



Las celebraciones internacionales son ocasiones para educar al público en general sobre temas de interés, movilizar la voluntad política y los recursos para abordar los problemas mundiales, y celebrar y reforzar los logros de la humanidad.

La mayoría de las celebraciones se han establecido mediante resoluciones de la Asamblea General de las Naciones Unidas. El Día Mundial del Agua (22 de marzo) se remonta a la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo de 1992, en la que se recomendó una celebración internacional del agua.

La Asamblea General de las Naciones Unidas respondió designando el 22 de marzo de 1993 como el primer Día Mundial del Agua. Desde entonces se celebra anualmente y es uno de los días internacionales más populares junto con el Día Internacional de la Mujer (8 de marzo), el Día Internacional de la Paz (21 de septiembre) y el Día de los Derechos Humanos (10 de diciembre).

Cada año, ONU-Agua —el mecanismo de coordinación de las Naciones Unidas en materia de agua y saneamiento— establece un tema para el Día Mundial del Agua que corresponde a un reto actual o futuro relacionado con el agua. Este tema también define el contenido del *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos* que se presenta el Día Mundial del Agua. La publicación es el informe insignia de ONU-Agua y proporciona a las personas responsables de la toma de decisiones herramientas para formular y aplicar políticas sostenibles en materia de agua. El informe también ofrece información sobre las principales tendencias, como el estado, el uso y la gestión del agua dulce y el saneamiento, basándose en el trabajo de los miembros y socios de ONU-Agua.

El informe es publicado por la UNESCO, en nombre de ONU-Agua, y su elaboración está coordinada por el Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos.

Las montañas, a menudo denominadas las “torres de agua” del mundo, son cada vez más vulnerables al cambio climático y a las actividades humanas insostenibles, amenazando los recursos hídricos de los que dependen miles de millones de personas e innumerables ecosistemas.

El *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2025 – Montañas y glaciares: torres de agua* llama la atención sobre los servicios y beneficios esenciales que las aguas de las montañas y los glaciares alpinos brindan a las sociedades, las economías y el medio ambiente. Centrándose en las respuestas técnicas y políticas necesarias para mejorar la gestión del agua en las montañas, el informe aborda cuestiones cruciales como el abastecimiento de agua y el saneamiento, las medidas de mitigación y adaptación al cambio climático, la seguridad alimentaria y energética, la industria, la reducción del riesgo de desastres y la protección de los ecosistemas.

En consonancia con la designación de 2025 como Año Internacional de la Conservación de los Glaciares y la resolución de 2022 de la Asamblea General de las Naciones Unidas sobre el desarrollo sostenible de las montañas, este informe llama la atención mundial sobre la importancia de las aguas de las montañas, incluidos los glaciares alpinos, para el desarrollo sostenible de las regiones montañosas y las sociedades que dependen de ellas río abajo, centrándose en los rápidos cambios que está experimentando la criosfera montañosa.

El Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos es el principal informe de ONU-Agua sobre cuestiones relacionadas con el agua y el saneamiento, y se centra en un tema diferente cada año. El informe es publicado por la UNESCO, en nombre de ONU-Agua, y su elaboración está coordinada por el Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos. El informe ofrece una visión de las principales tendencias relativas al estado, uso y gestión del agua dulce y el saneamiento, basada en el trabajo realizado por los miembros y socios de ONU-Agua. Presentado en concomitancia con el Día Mundial del Agua, el informe proporciona a las personas responsables de la toma de decisiones conocimientos y herramientas para formular y aplicar políticas sostenibles en materia de agua. También ofrece las mejores prácticas y análisis en profundidad para estimular ideas y acciones para una mejor gestión en el sector del agua y en otros sectores relacionados.

WWAP agradece la contribución económica del Gobierno italiano y de la Región Umbria.



Regione Umbria



La versión en español del *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos* (WWDR) 2025 ha sido posible gracias a la ayuda de la ANEAS.

