

## **Una aproximación hacia la seguridad hídrica en los Andes tropicales: desafíos y perspectivas**

**Fabian Drenkhan**

*Pontificia Universidad Católica del Perú*

*ORCID: 0000-0002-9443-9596*

**Sofía Castro-Salvador**

*Pontificia Universidad Católica del Perú,*

*Instituto de la Naturaleza, Tierra y Energía (INTE-PUCP)*

*ORCID: 0000-0002-4054-020X*

**Resumen:** Los Andes tropicales representan una región clave en términos de biodiversidad, diversidad cultural y múltiples servicios ecosistémicos. Son la base para la subsistencia humana para millones de habitantes, la cual se ve cada vez más afectada dada la creciente inseguridad hídrica debido a los impactos acoplados de cambios en la cobertura de suelo y climáticos. En los últimos años, importantes esfuerzos enfocados en las partes altas de las cuencas implementando pagos por servicios ambientales e infraestructura natural, han abierto varias oportunidades para afrontar la inseguridad hídrica en los Andes tropicales. Sin embargo, existe insuficiente conocimiento para evaluar niveles de seguridad hídrica en escalas espacio-temporales adecuadas para desarrollar estrategias de adaptación localmente relevantes. Esta limitación se debe a la escasez de datos en combinación con conceptos y métricas inconsistentes, y planteamientos incompletos para integrar todos los componentes de la seguridad hídrica dentro de un marco común. Además, se requiere alinear políticas públicas que sean compatibles con las necesidades locales. Este estudio explora las limitaciones actuales y perspectivas para estudiar e incrementar la seguridad hídrica en la región. El establecimiento de redes de monitoreo y colección de datos, incluyendo diseños participativos

y de conocimientos diversos, resultan clave. La modelización de seguridad hídrica requiere crear fuertes vínculos entre los diferentes componentes del ciclo de agua y los usuarios del agua. Estos esfuerzos deben ser integrados en un marco de colaboración transdisciplinario entre la ciencia, la política y la comunidad que facilite vías de adaptación eficaces, sólidas y localmente adaptadas.

**Palabras clave:** Seguridad hídrica. Soluciones basadas en naturaleza. Adaptación al cambio climático. Andes tropicales.

## **An Approach Towards Water Security in the Tropical Andes: Challenges and Perspectives**

**Abstract:** The tropical Andes represent a key region in terms of biodiversity, cultural diversity, and multiple ecosystem services. They serve as the foundation for human subsistence for millions of inhabitants, which is increasingly affected by growing water insecurity due to the coupled impacts of land cover and climate changes. In recent years, important efforts focused on headwaters in highland areas, implementing payments for environmental services and natural infrastructure, have created several opportunities to address water insecurity in the tropical Andes. However, there is insufficient knowledge to assess levels of water security at spatio-temporal scales suitable for developing locally relevant adaptation strategies. This limitation is due to a scarcity of data combined with inconsistent concepts and metrics, and incomplete approaches to integrate all components of water security within a common framework. In addition, there is a need to align public policies that fit local needs. This study explores current limitations and prospects for studying and increasing water security in the region. The establishment of monitoring and data collection networks, including participatory and diverse knowledge designs, is crucial. Modeling water security modeling requires creating strong linkages between the different components of the water cycle and water users. These efforts should be integrated into a transdisciplinary collaborative framework involving science, policy, and community, facilitating effective, robust, and locally tailored adaptation pathways.

**Keywords:** Water security. Nature-based solutions. Climate change adaptation. Tropical Andes.

### **Fabian Drenkhan**

Doctor en Geografía por la Universidad de Zurich y postdoctorado en Recursos Hídricos por la Imperial College London. Investiga en la interfaz de glaciología, recursos hídricos y adaptación al cambio climático en los Andes tropicales. Actualmente, trabaja como docente investigador a tiempo completo en la sección de Geografía y Medio Ambiente del Departamento de Humanidades de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Es miembro de la Asamblea del Instituto de la Naturaleza, Tierra y Energía (INTE-PUCP) y del grupo de investigación trAndeS, Desigualdad Ecológica y Territorial (impulsado por la Freie Universität Berlin y la PUCP).

**Correo:** fdrenkhan@pucp.pe

### **Sofía Castro Salvador**

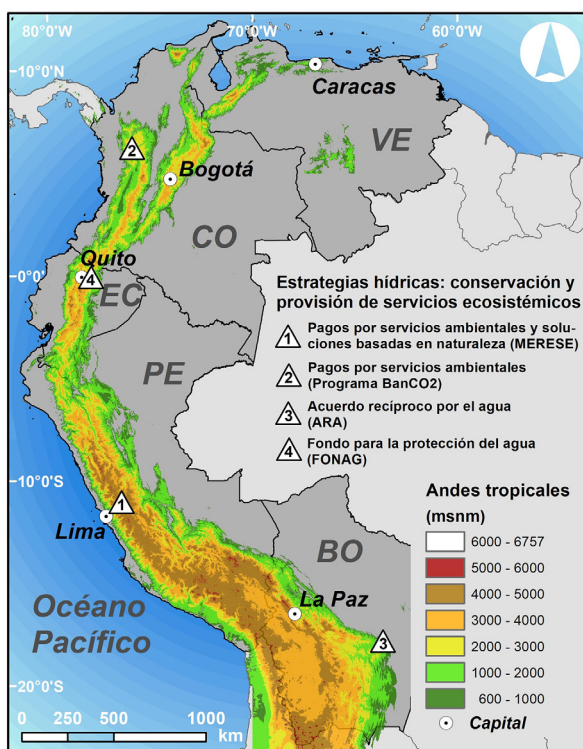
Economista, doctoranda y master en Geografía por la Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne (Francia). Tiene una maestría en Desarrollo Ambiental por la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Trabaja temas sobre gobernanza hídrica, territorios de agua y adaptación al cambio climático en cuencas de la región hidrográfica del Pacífico del Perú. Actualmente es coordinadora de grupos de investigación del Instituto de la Naturaleza, Tierra y Energía (INTE-PUCP) y miembro del grupo de investigación trAndeS, Desigualdad Ecológica y Territorial (impulsado por la Freie Universität Berlin y la PUCP).

**Correo:** castro.sa@pucp.pe

## 1. Los Andes tropicales: un acercamiento

Los Andes tropicales se extienden a lo largo de un área total de 1.6 millones de km<sup>2</sup> entre el norte de Venezuela (~11°N) hasta el sur de Bolivia y Argentina (~23°S) (Figura 1). Se elevan entre 600 m s. n. m. hasta los 6757 m s. n. m., siendo el Huascarán de la Cordillera Occidental (Perú), la cumbre más alta (INAIGEM, 2017). Esta región está conformada por una cadena montañosa relativamente joven, la cual se ha levantado en el Cenozoico durante los últimos 20 millones de años generando una alta diversidad de climas y pisos ecológicos únicos (Josse et al., 2011).

**Figura 1: Vista conjunta sobre la región de los Andes tropicales conformada por cinco países**



Nota: Vista conjunta sobre la región de los Andes tropicales conformada por cinco países: Venezuela (VE), Colombia (CO), Ecuador (EC), Perú (PE) y Bolivia (BO). Se incluyen las capitales (círculos con puntos) de cada país y las ubicaciones (triángulos) de las principales estrategias hídricas presentadas en este estudio. Se muestra la topografía de los Andes tropicales (600-6757 m s. n. m.) mediante una superposición de un Modelo Digital de Elevación SRTM v4.1 global remuestreado (CGIAR-CSI, 2018).

Los Andes tropicales son considerados uno de los *hotspots* más importantes del mundo debido al alto grado de biodiversidad y endemismo, y los fuertes impactos antrópicos. Dentro de una variedad de unos 130 ecosistemas a lo largo de la región, se halla un total de más de 35 000 especies de plantas vasculares y vertebrados con un alto nivel (alrededor del 50%) de endemismo. Más de 1400 especies de ellas están amenazadas de extinción, en gran parte debido a los impactos por cambios en la cobertura de suelo. Un 11% del área total de este *hotspot* está concesionado por la minería, además de presentar fuertes impactos por la actividad minera informal. La expansión de la frontera agrícola genera una presión adicional en hasta el 65% de las áreas clave del *hotspot* de los Andes tropicales. Entre 2001 y 2019, se han perdido alrededor de 4 millones de hectáreas de bosques (CEPF, 2021).

Aproximadamente 60 millones de personas, incluyendo cuatro capitales nacionales (Caracas, Bogotá, Quito y La Paz) y 29 ciudades de más de 200 000 habitantes, viven en los Andes tropicales. Alrededor del 17% de esta población pertenece a comunidades indígenas que componen más de 50 etnias en al menos 21% del área total. La subsistencia humana en esta región depende altamente de sus servicios ecosistémicos incluyendo la disponibilidad de los recursos hídricos («torres de agua») y reservas de carbono. Se estima que los Andes tropicales almacenan un total de 7.4 millones de gigatoneladas de carbono en la biomasa vegetal, un volumen que aún excede el presupuesto de carbono de México (2016-2025) para cumplir con los esfuerzos de mitigación frente a los impactos del cambio climático en el marco del Acuerdo de París (CEPF, 2021).

La región contiene considerables reservas de agua dulce, con un promedio de 53 000 m<sup>3</sup>/cápita/año (sin contar a Venezuela), lo cual la sitúa como el área de mayor disponibilidad hídrica a nivel mundial (CAN, 2010). Sin embargo, estos altos valores no reflejan la distribución del agua en la región, considerando una fuerte estacionalidad hídrica en la sierra entre Ecuador y Bolivia, así como una distribución espacial con un exceso de precipitación (más de 3000 mm/año) en zonas de selva desde Bolivia hasta Colombia, y un déficit de precipitación (0-400 mm/año) en la parte desértica y del altiplano boliviano-peruano. Esta disponibilidad desproporcional extrema de la precipitación y de las reservas hídricas, genera efectos de exceso de agua. Por ejemplo, en forma de flujos de detritos en las laderas andino-amazónicas. Mientras que en las zonas altoandinas se caracterizan por una fuerte escasez de agua debido a, por ejemplo, la temperatura e insolación extremas (como el límite arbóreo; no hay una cobertura de nieve extensa como en otras zonas de latitudes medias o altas) y una marcada estacionalidad (una época seca de 4-6 meses en partes de Perú y Bolivia).

El uso de los recursos hídricos está dominado por la agricultura que representa un 78% del consumo total en la región (sin contar a Venezuela), liderado por Ecuador (83%) y, en una menor proporción, Colombia (65%). El agua para riego cuenta con niveles muy bajos de eficiencia, alrededor del 30-40%, debido a un conjunto de factores como tecnologías desfasadas, infraestructuras obsoletas y/o con poco mantenimiento, bajo nivel de capacitación de agricultores y condiciones naturales desafiantes (riego en laderas, alta evapotranspiración de áreas y cultivos, entre otros) (CAN, 2010). El consumo doméstico equivale a un 13% en la región, mientras que el uso industrial llega a un 9%. Estos números no reflejan la situación compleja de la situación de la disponibilidad de agua potable y su aprovechamiento. Por ejemplo, únicamente el 75% (91% en Ecuador y solamente 63% en el Perú) de la población rural tiene acceso a fuentes seguras del agua y solamente el 50% (72% en Ecuador y solo 63% en el Perú) de esta parte de la población cuenta con saneamiento básico en la región.

En cuanto al uso no-consuntivo de agua, la producción hidroeléctrica representa la base de seguridad energética en la región. En los cinco países se cuenta con una capacidad instalada de hidroenergía de 38.5 GW, liderado por Venezuela (15.4 GW) y en menor capacidad Bolivia (0.7 GW) (IHA, 2022). El sector hidroeléctrico está creciendo rápidamente en la mayoría de países de la región conforme aumenta el crecimiento económico debido a la necesidad de satisfacer una creciente demanda energética y contribuir a proyectos de mitigación ante el cambio climático. En 2021, la capacidad hidroeléctrica agregada fue de 120 MW. Por ejemplo, en Perú, la capacidad hidroeléctrica instalada ha aumentado en un 147% desde 2005 y actualmente representa el 36% de la capacidad total instalada de energía (15.3 GW) (MINEM, 2015, 2023). Sobre todo en la región andino-amazónica, los gobiernos regionales están priorizando la construcción de grandes presas para satisfacer la demanda energética en la región, lo cual suscita preocupación por las consecuencias socioambientales a menudo negativas, generando impactos en la fauna acuática, transformaciones en el paisaje, reasentamientos involuntarios y conflictos de agua por el control del recurso hídrico, entre otros (Anderson et al., 2018; Boelens et al., 2019; Drenkhan et al., 2019; Saldi et al., 2015).

## **2. Impactos en las reservas hídricas altoandinas**

A la situación desafiante —anteriormente descrita— sobre el recurso hídrico naturalmente (por periodos) escaso o inaccesible, se suman impactos del crecimiento de población, una rápida urbanización y una creciente demanda de agua para diversos usos, así como los efectos del cambio climático (Schoolmeester et al., 2018).

Los Andes tropicales cuentan con un área glaciar considerable. El Perú tiene un total de 1114 km<sup>2</sup>, seguido por Bolivia (346 km<sup>2</sup>), Ecuador (44 km<sup>2</sup>) y Colombia (37 km<sup>2</sup>) (INAIGEM, 2018; Ramírez, 2014; Cáceres, 2018; IDEAM, 2018). En estos años, Venezuela, que solamente cuenta con un último glaciar, el Pico Humboldt (4942 msnm), se convierte en el primer país postglaciar (Ramírez et al., 2020). El agua de deshielo glaciar representa una importante reserva de agua a nivel local y para algunas ciudades aguas abajo. En promedio, los glaciares contribuyen un 2% para Quito (Ecuador), 19% para Huaraz (Perú) y 15% para La Paz (Bolivia), en la oferta superficial de río total anual disponible. En periodos de sequía, este aporte al caudal de río aumenta considerablemente hasta 15% para Quito, 91% para Huaraz y 86% para La Paz, a nivel mensual (Buytaert et al., 2017). Sin embargo, conforme van retrocediendo los glaciares, la contribución glaciar relativa al caudal va reduciéndose, de forma más notable en la época seca (junio-setiembre) y en las cuencas altas donde el aporte glaciar es mayor.

Entre 2000 y 2018, los glaciares de la región han perdido una masa glaciar equivalente a un 0.43 m de agua al año, con valores más altos en Bolivia (0.51 m equivalente de agua al año) (Castellanos et al., 2022; Dussailant et al., 2019). Esta situación amenaza la disponibilidad de agua potable para los sistemas socioecológicos (Vuille et al., 2018). Esto incluye una cantidad de agua no adecuada, ya sea por una escorrentía muy baja o excesiva (Motschmann et al., 2020), o por el incremento de la acidificación, debido al drenaje ácido de roca o por la contaminación de metales pesados, en cuencas que están en proceso de desglaciación y donde sus sedimentos empiezan a quedar expuestos (Santofimia et al., 2017).

Sin embargo, no existe una evaluación de todos los componentes del ciclo hidrológico para obtener un panorama más completo sobre las reservas hídricas, sus flujos e interacciones en la región. Existen grandes extensiones de humedales altoandinos, entre los 3000-5000 m s. n. m., los páramos tienen una extensión de alrededor de 35 000 km<sup>2</sup> (desde Venezuela hasta el norte del Perú) (Correa et al., 2020) y los bofedales un área mayor a los 11 000 km<sup>2</sup> (Perú y Bolivia) (INAIGEM, 2023). Este conjunto de comunidades vegetales que almacenan y regulan agua del subsuelo y subterránea pueden tener un rol hidrológico clave en la proporción de agua potable a nivel local y regional, y, por lo tanto, representar un amortiguador, por ejemplo, frente al derretimiento glaciar (Polk et al., 2017). No obstante, no existen estudios sistemáticos para entender su rol hidrológico y cuantificar los correspondientes componentes y flujos de agua. Generalmente, prevalece un vacío de conocimiento sobre los flujos de agua subterránea y cómo estos interactúan en el ciclo hidrológico

andino frente al cambio climático para amortiguar, entre otros, una creciente escasez de agua en periodos de sequía (Drenkhan et al., 2023).

### **3. Riesgos hidrológicos en un marco de seguridad hídrica**

#### **3.1 Riesgos hidrológicos**

En el Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), el Grupo de Trabajo II identifica ocho riesgos clave (RC) en la región, riesgos con consecuencias adversas potencialmente severas para los sistemas socioecológicos. Tres de ellos están directamente ligados a la disponibilidad hídrica en los Andes tropicales: i) el riesgo de inseguridad alimentaria debido a sequías frecuentes y extremas, ii) el riesgo a la vida e infraestructura por inundaciones y deslizamientos, y iii) el riesgo de inseguridad hídrica por cambios en la oferta hídrica (Castellanos et al., 2022). El RC de inseguridad alimentaria se debe sobre todo a periodos de sequía más largos y frecuentes, la disminución de la precipitación anual y al retraso del inicio de la estación lluviosa, y la desertificación de las regiones semiáridas (como el Altiplano entre Perú y Bolivia). Las consecuencias incluyen, entre otras, una disminución sustancial del rendimiento de los cultivos clave, la interrupción de las cadenas de suministro de alimentos, una reducida capacidad o producción de bienes y una reducción de la seguridad alimentaria y mayor malnutrición. El RC a la vida e infraestructura se debe a tormentas más frecuentes y severas, así como a eventos de precipitación intensa. Además, se vincula con el retroceso glaciar, la formación de lagunas glaciares, el descongelamiento del permafrost y el aumento del riesgo de desastres, incluyendo inundaciones por desborde de lagunas glaciares. Lleva a pérdidas de vida y efectos sanitarios graves en la salud, así como la interrupción de infraestructura y sistemas de servicios. El RC de inseguridad hídrica se debe al retroceso glaciar, periodos de sequía más frecuentes y largos, y cambios en la circulación atmosférica y patrones de precipitación. Sus consecuencias incluyen cambios en la disponibilidad estacional de agua debido al retroceso glaciar, el cambio de la cobertura de nieve, períodos secos más pronunciados y una gestión y gobernanza del agua fallidas (Castellanos et al., 2022).

Un cuarto RC relevante trata el riesgo de cambios a gran escala y desplazamientos de biomas en la Amazonia, por ejemplo, la transición del bosque tropical a otros biomas, como el bosque estacional o la sabana. Este riesgo se genera por la deforestación y degradación de bosques, y con ello la ocurrencia de períodos de sequía más frecuentes y persistentes, así como un



aumento de la temperatura y una reducción de la precipitación anual. Esta transformación de ecosistemas implica el riesgo de que la Amazonia pase de una función de sumidero a emisor de carbono, y de esta manera aumentaría el nivel de concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Este RC se vincula con la región de estudio ya que existe una estrecha conectividad entre la cobertura de bosque en la Amazonía occidental, los patrones de circulación atmosférica y el contenido de humedad y la disponibilidad hídrica en los Andes tropicales (Segura et al., 2020; Sierra et al., 2022).

### **3.2 Seguridad hídrica: analizando sistemas socioecológicos de forma integrada**

Para analizar y enfrentar los múltiples riesgos del agua que se vinculan tanto con procesos físico-naturales como con procesos socioeconómicos, se requiere de una comprensión amplia e interconectada en sistemas socioecológicos. Esta comprensión incluye, por un lado, identificar y entender los complejos vínculos entre los cambios en la atmósfera, criósfera, los ecosistemas de montaña y el ciclo hidrológico; por otro lado, los procesos del crecimiento de población, cambios en la cobertura de suelo, así como el uso y la gestión de agua (Drenkhan et al., 2023). Un marco ampliamente reconocido que atiende la necesidad de una vista integrada para analizar los desafíos multidimensionales del agua se centra en el concepto de seguridad hídrica. La seguridad hídrica integra tanto niveles aceptables de calidad como cantidad de agua disponibles para los usuarios (Bakker, 2012; Grey & Sadoff, 2007). Esto engloba conceptos de gobernanza del agua que garanticen el acceso a agua potable e incluyan explícitamente umbrales más allá de los cuales los sistemas socioecológicos son cada vez más vulnerables. Esta comprensión se vincula estrechamente con el riesgo hidrológico, lo cual forma parte esencial de la seguridad hídrica ya que permite establecer umbrales a partir de los cuales un nivel de presencia de calidad o cantidad de agua sería considerado inseguro. De esta manera permite una mejor evaluación de los impactos, amenazas o puntos de inflexión relacionados con el agua (Drenkhan et al., 2023; Pahl-Wostl et al., 2016). Además, el análisis del riesgo hidrológico como parte de la seguridad hídrica permite reconocer incertidumbres que a menudo persisten en la región cuando se analizan los sistemas socioecológicos complejos. De esta manera, permite comprender incertidumbres como parte del análisis que no pueden ser removidos con métodos comunes de manejo de información y análisis de bases de datos (Höllermann & Evers, 2015).

## **4. Esfuerzos de adaptación**

Frente a los múltiples riesgos hidrológicos, los países vienen desplegando diversos esfuerzos para adaptarse a los cambios hidroclimáticos, como las soluciones basadas en naturaleza —que incluye la infraestructura natural y adaptación basada en ecosistemas— y también soluciones híbridas que combinan infraestructura natural con la gris (Castellanos et al., 2022). En la región andina, estos esfuerzos se concentran principalmente en las partes altas de las cuencas como una manera de enfrentar estos riesgos. Desde 1992, muchas de estas soluciones, basadas en conocimientos y saberes ancestrales, son promovidas y vinculadas con mecanismos económicos y estrategias de grandes actores económicos para enfrentar los efectos del cambio climático y proteger la biodiversidad (Aubertin et al., 2018). Los países han construido diversos arreglos institucionales orientados en canalizar e invertir en medidas orientadas a la conservación, recuperación y uso sostenible de los ecosistemas como fuente de servicios ecosistémicos.

### **4.1 Arreglos institucionales para pagos por servicios ambientales y conservación**

Perú y Colombia han construido marcos normativos asociados a la conservación de ecosistemas y los servicios que estos brindan. A partir de 2014, el Perú aprueba una serie de normas vinculadas a la conservación de ecosistemas con esquemas de pago para la protección y mantenimiento de los servicios ecosistémicos hídricos y en particular aquellos vinculados con las empresas prestadoras de servicios de agua y saneamiento para garantizar la sostenibilidad de las fuentes de agua para uso potable a través de un acuerdo voluntario entre la empresa y los pobladores que viven aguas arriba y contribuyen a conservar y/o restaurar un determinado ecosistema. (Castro-Salvador (en prep.), 2023). Por su parte, Colombia en 2013 aprueba un marco normativo para la implementación de esquemas de Pagos por Servicios Ambientales (PSA) como herramienta para la conservación de recursos hídricos que proveen agua a los acueductos municipales, distritales y regionales. En este caso, se otorga un incentivo económico en dinero o especie, determinado por el costo de oportunidad del terreno, a los propietarios o poseedores de ecosistemas estratégicos para conservación y preservación, a través de un acuerdo voluntario con los beneficiarios de los servicios ambientales aguas abajo (Jurado & Castro, 2018).

Ecuador y Bolivia no cuentan con una legislación específica que regule los mecanismos PSA, pero sí han añadido en su Constitución artículos sobre los

derechos de la naturaleza y el buen vivir con el fin de proteger ecosistemas clave (Barié, 2014; Chafla & Cerón, 2016). En el caso de Ecuador, el reconocimiento de los derechos de la naturaleza tiene como fin prevenir la degradación de los ecosistemas y la precaución en cuanto al manejo de los recursos (Chafla & Cerón, 2016). Asimismo, se señala que los servicios ambientales no son susceptibles de apropiación privada directa y es el Estado quien se encarga de regular los posibles modelos de PSA (Garzón, 2018). En el caso de Bolivia, los servicios prestados en áreas protegidas, tales como la conservación de la biodiversidad, la investigación científica, la recreación, la educación y el turismo ecológico, están incluidos en diversas leyes, y la mayoría de proyectos de PSA se implementan a escala comunitaria (Flores et al., 2018).

## **4.2 Soluciones basadas en naturaleza: conocimiento ancestral**

Lima, capital del Perú, está ubicada en una zona desértica hiperárida, con alta nubosidad y humedad (de Reparaz, 2013), que concentra la tercera parte de la población del país (INEI, 2020) y el 44% del PBI nacional (INEI, 2022). Sin embargo, las fuentes abastecedoras de agua para Lima provenientes de las cuencas Chillón, Rímac y Lurín, y del trasvase de la cuenca del Alto Mantaro hacia el río Rímac (el sistema regulado Santa Eulalia y Yuracmayo ampliando la divisoria del Pacífico<sup>1</sup>) no son suficientes, debido a la creciente demanda de agua para uso poblacional y energético, y a los efectos del cambio climático. Por ello, desde hace algunos años se viene implementando soluciones basadas en naturaleza. Aunque este tipo de medidas no son nuevas, se practican desde épocas precolombinas para el manejo del territorio y del agua, tales como los puquios en Nazca, las amunas en Huarochiri, los waru waru en la sierra sur, entre otros (Ponce-Vega, 2015), y en los últimos años se vienen promoviendo desde el Estado, organizaciones no gubernamentales (ONG) y la cooperación internacional. La empresa pública de agua y alcantarillado de Lima y Callao, SEDAPAL, implementó en 2021 el primer proyecto de recuperación del servicio ecosistémico de regulación hídrica en la microcuenca de Milloc de la parte alta de la cuenca del Rímac, a través de los Mecanismos de Retribución por Servicios Ecosistémicos (MERESE). Cada mes, SEDAPAL recauda el 1% de lo que pagan los usuarios de Lima y Callao por el servicio de agua. Los MERESE han permitido a la empresa un cambio en la visión sobre el ciclo del agua. SEDAPAL, que antes se enfocaba solo en el agua que llegaba a su planta de tratamiento, ahora tiene una mirada de cuenca y en especial comprende que las partes altas de la cuenca son las zonas productoras de agua.

---

<sup>1</sup> Ver ANA (s.f.).

Sin embargo, empezar con la implementación de este proyecto no fue tarea fácil. Primero, debido a las demoras de la propia administración pública, y luego, porque desde un inicio no se tomó en cuenta el sistema de gobierno comunal y la manera como toman decisiones las comunidades. Finalmente, el proyecto se implementó y un año después fue entregado a la Comunidad Campesina de Carampoma, en cuyo terreno comunal se implementó el proyecto, con el compromiso de que la operación y mantenimiento del proyecto estuviera a cargo de los comuneros con el apoyo de SEDAPAL. (Castro-Salvador (en prep.), 2023).

Este no es el único esfuerzo que se realiza en la parte alta del Rímac, Aquafondo, un fondo de agua para Lima y Callao, viene trabajando en la recuperación de infraestructura natural para la recarga artificial de acuíferos, a través de una práctica ancestral de siembra y cosecha de agua conocida como «amunas», en la comunidad de San Pedro de Casta. Hasta el momento se han rehabilitado un poco más de 34 km de amunas con aportes del sector privado y de la cooperación internacional. Entre diciembre de 2017 y febrero de 2018, realizaron un monitoreo hidrológico en una de estas amunas en una sección de casi 2 km encontrando una infiltración potencial de 2258 m<sup>3</sup>/km (Ricra et al., 2022). A pesar de este dato preliminar sobre la recarga del acuífero, este no es suficiente y se requiere análisis hidrológicos sistemáticos para cuantificar el real beneficio hídrico a lo largo de la cuenca, o al menos en el total de amunas rehabilitadas. En un contexto de una nueva ruralidad que incluye un proceso de emigración elevado, debido a su cercanía a la metrópoli de Lima, y la carencia de servicios básicos y de oportunidades económicas, este tipo de intervenciones puede resultar atractivo en un determinado momento para las poblaciones de estas comunidades ya que su implementación y mantenimiento genera mano de obra local. En los proyectos realizados por SEDAPAL, la mano de obra es remunerada, pero es una contratación temporal y de acuerdo con el tipo de trabajo/oficio se contrata a un número reducido de comuneros para la etapa de implementación; y en etapa de mantenimiento, es mucho menor.

El Estado, por su parte, reconoció este tipo de prácticas ancestrales y su potencial beneficio para la seguridad hídrica. En 2016, el Ministerio de Agricultura y Riego realizó una tipología de proyectos de siembra y cosecha de agua sobre la base de 15 experiencias a nivel nacional, con el fin de conocer la diversidad de prácticas, así como las necesidades y potencialidades del territorio, orientado principalmente a respuestas frente a procesos de degradación ambiental en cuencas andinas y amazónicas por efectos antrópicos y cambio climático (MINAGRI, 2018). Esta tipología serviría para la elaboración de un programa nacional de siembra y cosecha de agua a largo

plazo. Sin embargo, con el cambio de gobierno y también de la dirección del ministerio, se dejó de lado esta iniciativa (Castro-Salvador (en prep.), 2023).

### **4.3 Conservación mediante incentivos y procesos participativos locales**

Al igual que el Perú, el Estado colombiano ha puesto especial énfasis en áreas estratégicas para la conservación del agua que provee del recurso a los acueductos municipales y distritales. Uno de los problemas críticos en el deterioro de los ecosistemas y sus servicios es la alta tasa de deforestación debido a la expansión urbana, ampliación de la frontera agrícola, cultivos ilícitos, entre otros.

Aunque no existe un programa nacional asociado con PSA, las entidades descentralizadas, como las corporaciones autónomas regionales, juegan un rol clave en este tipo de mecanismos a escala regional y local (Jurado & Castro, 2018). Las corporaciones son las encargadas de identificar, delimitar y priorizar las áreas y ecosistemas de interés estratégicos susceptibles a esquemas PSA. En algunos casos, cofinancian en coordinación con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo, quien además brinda el soporte técnico para la formulación, implementación y evaluación de los proyectos; en otros casos se asocian con organizaciones de la sociedad civil, como es el caso del programa BanCO2.

BanCO2 surge en 2013, por iniciativa de la Corporación autónoma regional de Antioquia y la Corporación MASBOSQUES, como un mecanismo de PSA con el propósito de compensar a comunidades que conservan bosques —con énfasis en captura de carbono— y contribuir de esta manera a los objetivos nacionales en la lucha contra el cambio climático. Este programa tiene intervenciones en diversas regiones del país, pero es en el departamento de Antioquia (noroeste de Colombia) donde tiene una mayor presencia. Antioquia es el segundo departamento con la mayor tasa de deforestación (60%), ocasionando pérdidas en términos de biodiversidad y servicios ambientales (Marín, 2017).

En este caso, los campesinos reciben un pago que proviene de la compensación por huella de carbono que realizan las personas naturales o jurídicas a través de una plataforma web. Este pago representa el costo de oportunidad de los campesinos, es decir, deberían recibir un pago igual o mayor por dedicarse a actividades de conservación para dejar sus actividades tradicionales como agricultura y ganadería (Jurado & Castro, 2018; Marín, 2017). Sin embargo, en algunos casos el pago que reciben está por debajo de lo que esperan los campesinos, es decir, no supera los ingresos recibidos por sus actividades anteriores. Esto motiva la salida de algunos campesinos del programa.

Existe la necesidad de (re)diseñar estos esquemas de incentivos para que más personas (naturales y jurídicas) compensen su huella de carbono, incluyendo estrategias de comunicación que muestren los riesgos y/o pérdidas de beneficio en los que se incurriría si no se realizan dichas actividades de conservación (Jurado & Castro, 2018; Marín, 2017). El programa busca que los beneficiarios puedan tener ingresos y empleos sustentables que contribuyan a la seguridad alimentaria a través de proyectos productivos sostenibles en actividades lícitas (Jurado & Castro, 2018).

De otro lado, en un estudio realizado a nivel nacional sobre este tipo de intervenciones, se encontró que la mitad de las corporaciones autónomas regionales tienen debilidades en el diseño e implementación de programas de PSA. Además, cuentan con un alto nivel de desconocimiento de la naturaleza del instrumento, una baja participación de las comunidades y una normatividad débil sobre PSA, incluida la debilidad de la gestión en la toma de decisiones relacionadas con el aprovechamiento y conservación de los recursos (Jurado & Castro, 2018).

Un esquema similar de compensación monetaria es lo que implementa la ONG Fundación Natura en Bolivia a través de los Acuerdos Recíprocos por el Agua (ARA). En este, un beneficiario y un usuario llegan a un acuerdo voluntario, que se establece por contrato, donde el beneficiario (aguas arriba) se compromete a conservar áreas de bosque a cambio de un incentivo económico para conservar, mientras que el usuario (aguas abajo) se compromete a retribuir (pagar) los esfuerzos de provisión de servicios ecosistémicos por la duración del contrato (Bétrisey et al., 2018). En esta negociación participan las entidades gubernamentales de administración de agua, quienes son los que recolectan los recursos. El valor de la retribución es decidido en procesos participativos entre los actores de la cuenca baja y cuenca alta (Catari, 2022).

Aunque el esquema aplicado en cada territorio difiere de acuerdo con el contexto histórico, social y ecológico local, lo común es que se firma un acuerdo de diez años entre tres actores: i) la cooperativa de agua, quien abre una cuenta bancaria hacia donde se canalizan los ingresos de la tarifa de servicios ambientales; ii) el gobierno municipal, encargado de la compra anual de colmenas, plántulas de árboles frutales, tuberías de riego u otras herramientas de desarrollo, que se otorgarán en compensación por las actividades de conservación forestal; y iii) Fundación Natura, quien brinda apoyo técnico y pone en marcha el esquema con el dinero recibido por sus donantes (Catari, 2022).

El primer ARA se realizó en 2003 en el municipio de Pampagrande, al este del departamento de Santa Cruz (suroriente de Bolivia), con un pequeño grupo de cinco regantes aguas abajo quienes negociaron un acuerdo con sus contrapartes aguas arriba. Luego se fueron sumando más agricultores, más hectáreas y más municipios vecinos, y han escalado hasta el nivel departamental. En este caso, los agricultores río arriba firmaron contratos para conservar los bosques y reducir sus actividades de pastoreo (Catari, 2022).

Los ARA han representado un cambio en la manera de hacer política sobre conservación de los bosques y la gestión de cuencas, ya que no es una imposición desde el gobierno central hacia las organizaciones locales y los usuarios, sino una negociación horizontal entre actores a lo largo de una cuenca (Catari, 2022). Esta manera de relacionarse entre los actores ha significado para las poblaciones «un reconocimiento» y una manera diferente de participación. Sentirse parte de algo y ser tomados en cuenta ha sido uno de los incentivos para ingresar a este esquema de ARA, sobre todo porque estos grupos, como las comunidades campesinas de las zonas altas, son o han sido mayormente ignorados por las instituciones públicas y a través de los ARA los ubica en una posición diferente y con capacidad de transformar sus condiciones locales. Sin embargo, el reconocimiento no es uniforme y estable todo el tiempo. En algunas comunidades existe un reconocimiento estable que ha llevado a mejores relaciones de participación y redistribución. En otros casos, no, y (re)produce injusticias y dominación e indirectamente legitima la estructura de poder existente. Normalmente, los individuos o grupos excluidos de este tipo de esquemas son aquellos que ya están excluidos debido a que son personas marginadas, en situación de pobreza o inmigrantes recientes y pequeños propietarios (Bétrisey et al., 2018).

Por otro lado, al igual que el caso de BanCO2, algunas poblaciones dentro de los esquemas ARA perciben que el valor económico de la compensación recibida es baja y marginalmente relacionado con los costos de oportunidad de mantener los bosques y sus servicios ecosistémicos asociados con la producción del agua. El monto de la compensación otorgada depende de la cantidad de tierra conservada, así como de la distancia entre la parcela y las cuencas de los ríos, pero no cubre por completo los costos de oportunidad económica. Por su parte, la ONG Natura identifica la necesidad de fortalecer la institucionalidad para evitar esquemas de comando y control; y de aprovechar las normas tradicionales de derecho colectivo y acción recíproca, ya que el ARA está basado en la gobernanza y gestión del agua en el contexto de una cuenca desde el enfoque del gobierno de los bienes comunes (Bétrisey et al., 2018).

#### **4.4 Fondos de protección del agua**

El Fondo para la protección del Agua (FONAG), primer fondo de protección del agua a nivel mundial, se creó en Ecuador en el año 2000, por iniciativa de la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento, junto con otros aliados nacionales e internacionales, para promover la protección de las cuencas que proveen agua a la población de la ciudad de Quito. FONAG es reconocido como un mecanismo innovador y descentralizado y tomado como modelo para la creación de otros fondos de agua en el mundo (Castellanos et al., 2022; Kauffman & Echavarría, 2013).

Surge por la necesidad de realizar acciones que garanticen la disponibilidad del recurso para la provisión de agua potable para la ciudad de Quito, que al igual que otras ciudades de América Latina, ha seguido un patrón de urbanización con una creciente población que se asienta principalmente en las áreas urbanas, altamente demandantes de agua (Castellanos et al., 2022). Al igual que los casos de Colombia y Bolivia, las acciones de conservación, restauración ecológica y educación ambiental se realizan a través de esquemas de PSA. En la cuenca alta del río Guayllabamba, las actividades de conservación de fuentes de agua realizadas han controlado de manera indirecta la deforestación y el cambio en el uso del suelo en las áreas de amortiguación de las zonas altas de los páramos, a través de la limitación de actividades agropecuarias a cambio de una compensación que no perjudique a los propietarios de la tierra (Garzón, 2018).

Una de las bondades que se resalta sobre los fondos de agua es que son una fuente sostenible de financiamiento para la conservación en las cuencas, lo que permite obtener beneficios a largo plazo, y además son una plataforma con diversos actores que facilita la toma de decisiones de manera colaborativa y la implementación de los proyectos (Kauffman & Echavarría, 2013). Sin embargo, a pesar de que FONAG cuenta con un capital importante y que a través de un fideicomiso va generando intereses permanentemente, tiene una alta dependencia de los aportes de la Empresa de agua de Quito y de la Empresa Eléctrica Quito y tiene dificultades para ampliar su base de financiamiento (Chafla & Cerón, 2016). A diferencia de los otros casos mencionados, no recibe aportes directos de los usuarios finales del agua, sino que cuenta con este aporte financiero mixto, público y privado.



## 5. Desafíos para analizar y fomentar la seguridad hídrica en la región

Cada vez más existen estudios sobre los impactos del cambio climático en los Andes tropicales, incluyendo el retroceso glaciar (Drenkhan et al., 2018; Dussailant et al., 2019; Vuille et al., 2018), ecosistemas paraglaciales (Correa et al., 2020; Cuesta et al., 2019; Zimmer et al., 2018) e hidrología de montaña (Buytaert et al., 2017; Somers et al., 2019; Soruco et al., 2015), entre otros. A la vez, se cuenta con un considerable número de estudios sobre modelos de implementación para la conservación de los recursos hídricos (Kauffman & Echevarría 2013; Chafla & Cerrón, 2016; Garzón, 2018), gobernanza y pagos por servicios ambientales (Catari, 2022; Flores et al, 2018, Jurado & Castro, 2018), transformaciones territoriales (Bleeker & Vos, 2019) e impactos de prácticas y conocimientos ancestrales en ecosistemas hídricos (Ricra et al, 2022; Ochoa-Tocachi et al, 2019).

Sin embargo, esta gama amplia de estudios y experiencias a menudo no permite evaluar la seguridad hídrica en la medida necesaria debido a las siguientes limitaciones:

- Escasez de datos continuos y de suficiente calidad (como calibración insuficiente de estaciones y sensores; carencia de mediciones de precipitación, caudal del río, flujos subterráneos, demanda de agua).
- Conceptos ambiguos, solapados o cuestionados (como la definición de vulnerabilidades y riesgos; diferencias entre estrés y escasez hídrica y enlaces con riesgos hídricos).
- Métricas no estandarizadas, inconsistentes o poco definidas (carencia de métricas esenciales, unidades y umbrales definidos para evaluar niveles de seguridad hídrica).
- Enlaces limitados entre los componentes del ciclo de agua y uso/demanda de agua (carencia de estudios de balance de agua que incluyan todos los componentes de la oferta superficial y subterránea de agua y lograr conectarlos con la demanda de agua).
- Carencia de estudios consistentes de vulnerabilidad humana como parte fundamental de la evaluación de riesgos (por ejemplo, el uso de un marco estandarizado del riesgo que incluye vulnerabilidades claramente definidas).
- Estudios desconectados no reconociendo escalas espaciales, incluyendo perspectivas de aguas arriba-abajo y/o transfronterizas (por ejemplo,

carencia de estudios que consideren las interdependencias entre usuarios de aguas abajo y arriba, y cómo ellos alteran la disponibilidad hídrica en la cuenca).

- Estudios no diferenciados que fallan en proporcionar condiciones a diferentes escalas temporales (no se provee resultados que consideren datos hidrológicos a corto plazo, a nivel estacional e interanual para captar la complejidad de sistemas de cuenca altamente influenciadas por estacionalidad y fenómenos climáticos interanuales a fin de poder entender periodos de nivel de agua críticos).
- Limitados estudios sobre gobernanza que muestren la manera como se organizan las sociedades rurales en torno a la gestión del agua, incluyendo la gestión del riesgo (limitados estudios sobre los diversos sistemas de gestión y las formas de gobierno del agua, ya sea comunal y/o individual, que consideren cómo las sociedades usan, manejan y controlan el recurso en sus diferentes temporalidades: en abundancia o escasez de lluvias).
- Ausencia de experiencias sistemáticas sobre maladaptación y adaptación fallida (mientras que hay un número creciente de implementación de medidas de adaptación, a menudo no se conoce su estado de funcionamiento, eficiencia, efectos secundarios o no deseados y aceptación local, y finalmente el grado de éxito de implementación a largo plazo).

Debido a esta situación de múltiples limitaciones y desafíos, persiste una escasa comprensión de los componentes clave y sus interacciones, los cuales determinan la seguridad hídrica según condiciones específicas en cada lugar. Además, esta situación dificulta el desarrollo de estrategias robustas y eficaces para la adaptación al cambio climático a fin de incrementar niveles de la seguridad hídrica.

## **6. Incrementando la seguridad hídrica**

Para implementar estrategias hídricas localmente relevantes y de esta manera incrementar niveles de seguridad hídrica, se requieren mayores esfuerzos en diferentes ámbitos y sectores. A continuación, detallamos los puntos clave que deben ser considerados en futuros estudios y proyectos de recursos hídricos en torno a la seguridad hídrica:

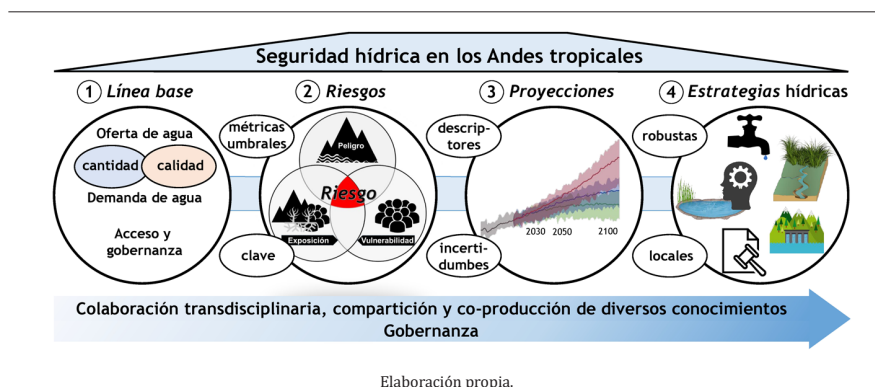
- Mayor esfuerzo en establecer redes de monitoreo (incluyendo esfuerzos participativos y de sencillo mantenimiento).

- Mejorar la comprensión de las lógicas y las coaliciones territoriales en donde se implementan las estrategias de adaptación al cambio climático.
- Aumentar el alcance de estas redes al usar tecnología de bajo costo con sensores sencillos y códigos abiertos establecidos en redes descentralizadas que se comparten libremente.
- Involucrar a partes interesadas en (partes de) la colección, el monitoreo y análisis de datos. Así como también involucrar a las poblaciones aguas arriba desde la idea de proyecto/política pública.
- En este contexto, aprovechar nuevas estrategias de colección de datos e involucramiento a personas locales no-científicas, por ejemplo, ciencia ciudadana.
- Proponer variables esenciales, métricas y modelos para la evaluación científica de la seguridad hídrica.
- Alinear políticas públicas para establecer planes de desarrollo del monitoreo de las variables esenciales de seguridad hídrica.
- Colaboración inter o transdisciplinaria entre científicos sociales y naturales.
- Democratización de compartir datos y transferir conocimientos mediante plataformas de acceso abierto y documentaciones transparentes.
- Integrar datos mejorados y la colección de conocimiento diverso en un marco de colaboración entre la ciencia, la política y la comunidad que oriente vías de adaptación eficaces, sólidas y localmente adaptadas.
- Alinear políticas públicas con las realidades y necesidades locales.

Por lo tanto, un marco para evaluar e incrementar la seguridad hídrica debe tomar en cuenta estos diferentes puntos críticos. Este marco podría ser construido mediante cuatro pasos principales: a partir de (1) una línea base sólida que incluya datos consistentes y relevantes a nivel espacio-temporal sobre oferta, demanda y acceso de agua. Para ello es imprescindible extender las redes de monitoreo tanto para medir la cantidad y calidad de agua; (2) definición de métricas y umbrales para la evaluación de riesgos (clave) en la intersección de peligro, exposición y vulnerabilidad de sistemas socioecológicos según definición en el AR6 del IPCC (Reisinger et al., 2020); (3) desarrollo de proyecciones futuras considerando incertidumbres y en base a descriptores que se construyen en colaboración con diferentes partes

interesadas locales y expertas; y (4) la formulación de estrategias hídricas robustas y localmente relevantes para reducir los efectos adversos del cambio climático y de otros impactos humanos. Este último paso requiere acoplar diferentes medidas de adaptación (ensambles de medidas de adaptación) en la cuenca alta y la cuenca baja incluyendo, por ejemplo, infraestructura natural y gris, así como políticas alineadas relevantes y adecuadas a nivel local, a fin de incrementar la seguridad hídrica (Figura 2).

**Figura 2. Marco para evaluar e incrementar la seguridad hídrica en los Andes tropicales**



## 7. Conclusiones

Los Andes tropicales son una región socioecológica muy diversa que contiene considerables reservas de agua dulce, las cuales están desproporcionalmente distribuidas y accesibles en el espacio y tiempo. A esta situación se suman los crecientes impactos del cambio climático y de los procesos socioeconómicos. Por eso, la región abarca varios riesgos hidrológicos clave vinculados al peligro de sequías, inundaciones y cambios en la oferta hídrica que generan una situación de creciente inseguridad hídrica.

En los últimos años, importantes esfuerzos en la región implementando estrategias hídricas para la conservación y provisión de servicios ecosistémicos, han abierto varias oportunidades para enfrentar la inseguridad hídrica. Este estudio caracteriza algunos de ellos, incluyendo pagos por servicios ambientales e infraestructura natural a lo largo de los Andes tropicales. Este estudio muestra que es fundamental conocer las lógicas y necesidades territoriales para lograr resultados efectivos relevantes a nivel local y de cuenca para ser sostenibles a largo plazo.

Para poder evaluar el éxito de la implementación de diversas estrategias hídricas para identificar el estado de la seguridad hídrica, se requiere analizar tanto los procesos físico-naturales como socioeconómicos mediante un marco de comprensión amplia e interconectada de sistemas socioecológicos complejos. Hasta la actualidad existe insuficiente conocimiento para evaluar niveles de seguridad hídrica en escalas espacio-temporales adecuadas localmente relevantes. Persiste una escasa comprensión de los componentes clave del ciclo hidrológico y sus interacciones con los usuarios y la gobernanza del agua, todo lo que determina la seguridad hídrica según condiciones específicas en cada lugar. Esta situación dificulta el desarrollo de medidas de adaptación eficaces y localmente relevantes.

Por lo tanto, se requieren mayores esfuerzos en establecer redes de monitoreo hidrológico e interconectar bases de datos diversas en un marco colaborativo transdisciplinario. Tal marco debe impulsar una mejora del estado del conocimiento y alinear políticas públicas con las necesidades locales para el desarrollo de estrategias hídricas robustas, eficaces y sostenibles a fin de incrementar niveles de la seguridad hídrica.

## Referencias

- ANA (s.f.). Sistema Hidráulico. <http://observatoriochirilu.ana.gob.pe/index.php/caracterización-de-cuencas/sistema-hidraulico>
- Anderson, E. P., Jenkins, C. N., Heilpern, S., Maldonado-Ocampo, J. A., Carvajal-Vallejos, F. M., Encalada, A. C., Rivadeneira, J. F., Hidalgo, M., Cañas, C. M., Ortega, H., Salcedo, N., Maldonado, M., & Tedesco, P. A. (2018). Fragmentation of Andes-to-Amazon connectivity by hydropower dams. *Science Advances*, 4, pp. 1-7. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aao1642>
- Aubertin, C., Couvet, D., & Flipo, F. (2018). Les services écosystémiques en renfort de la marchandisation de la nature? *Nachhaltigkeit Und Transition: Politik Und Akteure: Sozio-Ökologische Transformation Aus Deutsch-Französischer Perspektive. Transition Écologique et Durabilité: Politiques et Acteurs: Regards Franco-Allemands Sur Le Changement Socio-Écologique*, pp. 191-214. <https://hal.science/hal-01996307>
- Bakker, K. (2012). Water Security: Research Challenges and Opportunities. *Science*, 337, pp. 914-915. <https://doi.org/10.1126/science.1226337>
- Barié, G. (2014). Nuevas narrativas constitucionales en Bolivia y Ecuador: el buen vivir y los derechos de la naturaleza. *Latinoamérica. Revista de Estudios Latinoamericanos*, 59, pp. 9-40. [https://doi.org/10.1016/S1665-8574\(14\)71724-7](https://doi.org/10.1016/S1665-8574(14)71724-7)
- Bétrisey, F., Bastiaensen, J., & Mager, C. (2018). Payments for ecosystem services and social justice: Using recognition theories to assess the Bolivian Acuerdos Recíprocos por el Agua. *Geoforum*, 92, pp. 134-143. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2018.04.001>

- Bleeker, S., & Vos, J. (2019). Payment for ecosystem services in Lima's watersheds: power and imaginaries in an urban-rural hydrosocial territory. *Water International*, 44(2), pp. 224-242. <https://doi.org/10.1080/02508060.2019.1558809>
- Boelens, R., Shah, E., & Bruins, B. (2019). Contested knowledges: Large dams and mega-hydraulic development. *Water*, 11, 416. <https://doi.org/10.3390/w11030416>
- Buytaert, W., Moulds, S., Acosta, L., De Bièvre, B., Olmos, C., Villacis, M., Tovar, C., & Verbist, K. M. J. (2017). Glacial melt content of water use in the tropical Andes. *Environmental Research Letters*, 12(11), 114014. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa926c>
- Cáceres, B. (2018). New Ecuadorian National Glacier Inventory. *Geophysical Research Abstracts*, 20. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2018/EGU2018-11214.pdf>
- CAN (2010). *El agua de los Andes - un recurso clave para el desarrollo e integración de la región* Lima: Comunidad Andina. [https://www.comunidadandina.org/StaticFiles/OtrosTemas/MedioAmbiente/AGUA\\_DE\\_LOS\\_ANDES.pdf](https://www.comunidadandina.org/StaticFiles/OtrosTemas/MedioAmbiente/AGUA_DE_LOS_ANDES.pdf)
- Castellanos, E. J., Lemos, M. F., Astigarraga, L., Chacón, N., Cuví, N., Huggel, C., Miranda, L., Vale, M. M., Ometto, J. P., Peri, P. L., Postigo, J. C., Ramajo, L., Roco, L., Rusticucci, M., Menezes, J. A., Borges, P., Bueno, J., Cuesta, F., Drenkhan, F., ... Valladares, M. (2022). Chapter 12: Central and South America. In 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, & B. Rama (Eds.). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability - Working Group II contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1689-1816). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.014>
- Castro-Salvador (en preparación). (2023). *La décentralisation et des territoires de l'eau: Enjeux, échelles et acteurs. Le cas des bassins versants de Lima et Piura, Pérou*. Paris 1 Panthéon-Sorbonne.
- Catari, F. P. (2022). *Los acuerdos recíprocos por agua. Un modelo de gobernanza para la sostenibilidad del agua y las cuencas a largo plazo* [Diplomado en desarrollo comunitario y gestión de proyectos de agua y saneamiento, Universidad Mayor de San Simón]. [http://ddigital.umss.edu.bo:8080/jspui/bitstream/123456789/33028/1/Monografia Pablo Catari.pdf](http://ddigital.umss.edu.bo:8080/jspui/bitstream/123456789/33028/1/Monografia%20Pablo%20Catari.pdf)
- CEPF (2021). *Hotspot de Biodiversidad de los Andes Tropicales - Perfil del Ecosistema - Actualización 2021*. Pronaturaleza-Fundación Peruana por la Conservación de la Naturaleza. <https://www.cepf.net/sites/default/files/tropical-andes-ecosystem-profile-2021-spanish.pdf>
- CGIAR-CSI (2018). *SRTM 90m DEM Digital Elevation Database*. <https://srtm.csi.cgiar.org/>
- Chafla, P., & Cerón, P. (2016). Pago por servicios ambientales en el sector del agua: el Fondo para la Protección de Agua. *Tecnología y Ciencias Del Agua*.
- Correa, A., Ochoa-Tocachi, B. F., Birkel, C., Ochoa-Sánchez, A., Zogheib, C., Tovar, C., & Buytaert, W. (2020). A concerted research effort to advance the hydrological understanding of tropical páramos. *Hydrological Processes*, 34, 4609-4627. <https://doi.org/10.1002/hyp.13904>

- Cuesta, F., Llambí, L. D., Huggel, C., Drenkhan, F., Gosling, W. D., Muriel, P., Jaramillo, R., & Tovar, C. (2019). New land in the Neotropics: a review of biotic community, ecosystem, and landscape transformations in the face of climate and glacier change. *Regional Environmental Change*, 19, 1623-1642. <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01499-3>
- De Reparaz, G. (2013). *Los ríos de la zona árida peruana*. Universidad de Piura - Institut Cartogràfic de Catalunya.
- Drenkhan, F., Buytaert, W., Mackay, J. D., Barrand, N. E., Hannah, D. M., & Huggel, C. (2023). Looking beyond glaciers to understand mountain water security. *Nature Sustainability*, 6 (February), pp. 130-138. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00996-4>
- Drenkhan, F., Guardamino, L., Huggel, C., & Frey, H. (2018). Current and future glacier and lake assessment in the deglaciating Vilcanota-Urubamba basin, Peruvian Andes. *Global and Planetary Change*, 169, pp. 105-118. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.07.005>
- Drenkhan, F., Huggel, C., Guardamino, L., & Haeblerli, W. (2019). Managing risks and future options from new lakes in the deglaciating Andes of Peru: The example of the Vilcanota-Urubamba basin. *Science of the Total Environment*, 665, pp. 465-483. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.070>
- Dussailant, I., Berthier, E., Brun, F., Masiokas, M., & Hugonnet, R. (2019). Two decades of glacier mass loss along the Andes. *Nature Geoscience*, 21, 5143. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0432-5>
- Flores, A., Aguilar, M., Reyes, H., & Guzmán, M. G. (2018). Gobernanza ambiental y pagos por servicios ambientales en América Latina. *Sociedad y Ambiente*, 16, pp. 7-31. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S2007-65762018000100007&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2007-65762018000100007&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- Garzón, C. P. (2018). *Modelos de pago por servicios ambientales (PSA) como herramienta para promover la conservación de los recursos naturales desde diferentes puntos de vista* [Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de: Especialista en planeación ambiental y manejo integrado de los recursos naturales, Universidad Militar Nueva Granada]. <https://core.ac.uk/download/pdf/286063854.pdf>
- Grey, D., & Sadoff, C. W. (2007). Sink or Swim? Water security for growth and development. *Water Policy*, 9(6), pp. 545-571. <https://doi.org/10.2166/wp.2007.021>
- Höllermann, B., & Evers, M. (2015). Integration of uncertainties in water and flood risk management. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 370, pp. 193-199. <https://doi.org/10.5194/piahs-370-193-2015>
- IHA (2022). 2022 - Hydropower Status Report - Sector trends and insights. *International Hydropower Association*, pp. 1-48. [https://www.hydropower.org/sites/default/files/publications-docs/2019\\_hydropower\\_status\\_report\\_0.pdf](https://www.hydropower.org/sites/default/files/publications-docs/2019_hydropower_status_report_0.pdf)
- INAIGEM (2017). *Expedición Científica Huascarán 2017 - Nota Técnica 01*. <https://repositorio.inaigem.gob.pe/handle/16072021/142>
- IDEAM (2018). *Informe del Estado de los Glaciares Colombianos*. [http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023828/Estado\\_glaciares\\_colombianos.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023828/Estado_glaciares_colombianos.pdf)
- INAIGEM (2023). *Inventario Nacional de Bofedales 2023 - Memoria descriptiva*. <https://repositorio.inaigem.gob.pe/items/61d605a3-5bba-4357-a1fc-a716d595af8a>

- INEI (2020). *Estado de la Población Peruana 2020*. [https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1743/Libro.pdf](https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1743/Libro.pdf)
- INEI (2022). *Producto Bruto Interno por Años, según Departamentos 2007 - 2021*. <https://m.inei.gov.pe/estadisticas/indice-tematico/producto-bruto-interno-por-departamentos-9089/>
- Josse, C., Cuesta, F., Navarro, G., Barrera, V., Becerra, M. T., Cabrera, E., Chacón-Moreno, E., Ferreira, W., Peralvo, M., Saito, J., Tovar, A., & Naranjo, L. G. (2011). Physical Geography and Ecosystems in the Tropical Andes. In S. K. Herzog, R. Martinez, P. M. Jørgenson, & H. Tiessen (Eds.), *Climate Change and Biodiversity in the Tropical Andes* (pp. 152-169). Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) and Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE). <http://www.bioone.org/doi/abs/10.1659/mrd.mm097>
- Jurado, M. C., & Castro, D. A. (2018). *El papel de las Corporaciones Autónomas Regionales en los esquemas de pagos por servicios ambientales (PSA): estado actual y lineamientos metodológicos de la gestión para el diseño de futuras implementaciones* [Facultad de Estudios Ambientales y Rurales, Pontificia Universidad Javeriana]. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.10554.38329>
- Kauffman, C. M., & Echavarría, M. (2013). The evolution of water trust funds in Ecuador. In H. Bjornlund, C. A. Brebbia, & S. Wheeler (Eds.), *Sustainable irrigation and drainage IV: management, technologies and policies* (Issue volume 168, pp. 3-16). WIT Press.
- Marín, J. (2017). *Evaluación del costo de oportunidad dentro de un programa de pago por servicios ambientales: estudio de caso de BanCO2 en Antioquia* [Memoria de Grado, Facultad de Economía, Universidad de los Andes]. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/61264/12323.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- MINAGRI (2018). *Programa Nacional de Siembra y Cosecha de Agua: Aportes y Reflexión desde la Práctica*. MINAGRI. <http://repositorio.midagri.gov.pe:80/jspui/handle/20.500.13036/225>
- MINEM (2015). *Plan Energético Nacional 2014-2025*.
- MINEM (2023). *Anuario estadístico de electricidad 2022*.
- Motschmann, A., Huggel, C., Muñoz, R., & Thür, A. (2020). Towards integrated assessments of water risks in deglaciating mountain areas: water scarcity and GLOF risk in the Peruvian Andes. *Geoenvironmental Disasters*, 7, 26. <https://doi.org/10.1186/s40677-020-00159-7>
- Ochoa-Tocachi, B. F., Bardales, J. D., Antiporta, J., Pérez, K., Acosta, L., Mao, F., Zulkafli, Z., Gil-Ríos, J., Angulo, O., Grainger, S., Gammie, G., De Bièvre, B., & Buytaert, W. (2019). Potential contributions of pre-Inca infiltration infrastructure to Andean water security. *Nature Sustainability*, 2(7), pp. 584-593. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0307-1>
- Pahl-Wostl, C., Gupta, J., & Bhaduri, A. (2016). Water security: a popular but contested concept. In C. Pahl-Wostl, J. Gupta, & A. Bhaduri (Eds.), *Handbook on Water Security* (pp. 1-16). Edward Elgar Publishing.
- Polk, M. H., Young, K. R., Baraer, M., Mark, B. G., McKenzie, J. M., Bury, J., & Carey, M. (2017). Exploring hydrologic connections between tropical mountain wetlands and glacier recession in Peru's Cordillera Blanca. *Applied Geography*, 78, pp. 94-103. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.11.004>



- Ponce-Vega, L. A. (2015). Puquios, qanats y manantiales: gestión del agua en el Perú antiguo. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 12(3), pp. 279-296. <https://www.scielo.org.mx/pdf/asd/v12n3/v12n3a2.pdf>
- Ramírez, E. (2014). *Inventario de Glaciares, Cuerpos de Agua y Bofedales*. Ministerio del Medio Ambiente y Agua. [https://books.google.com.pe/books/about/Inventario\\_de\\_glaciares\\_cuerpos\\_de\\_agua.html?id=FTkcjwEACAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com.pe/books/about/Inventario_de_glaciares_cuerpos_de_agua.html?id=FTkcjwEACAAJ&redir_esc=y)
- Ramírez, N., Melfo, A., Resler, L. M., & Llambí, L. D. (2020). The end of the eternal snows: Integrative mapping of 100 years of glacier retreat in the Venezuelan Andes. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 52(1), pp. 563-581. <https://doi.org/10.1080/15230430.2020.1822728>
- Reisinger, A., Howden, M., Vera, C., Garschagen, M., Hurlbert, M., Kreibiehl, S., Mach, K. J., Mintenbeck, K., O'Neill, B., Pathak, M., Pedace, R., Pörtner, H.-O., Poloczanska, E., Rojas Corradi, M., Sillmann, J., Van Aalst, M., Viner, D., Jones, R., Ruane, A. C., & Ranasinghe, R. (2020). *The concept of risk in the IPCC Sixth Assessment Report: a summary of cross-Working Group discussions*.
- Ricra, O., Quino, P., & Vázquez, G. (2022). Siembra de agua a través de infraestructura natural de recarga hídrica (AMUNA) en la comunidad San Pedro de Casta, Lima, Perú. *IDESIA*, 40(3), pp. 51-57. [https://revistas.uta.cl/pdf/1337/05-ricra40\\_3\\_2021.pdf](https://revistas.uta.cl/pdf/1337/05-ricra40_3_2021.pdf)
- Saldi, L., Henríquez, D., Perdomo, J., & Roca-Servat, D. (2015). El proyecto hidroenergético de Salcca Pucara en Perú: percepciones de cambio, relaciones de poder, y estrategias de inserción al territorio. (In) *Justicias Hídricas, Resistencias y Alternativas En América Latina*, 2, pp. 35-40. [https://www.academia.edu/34354803/El\\_proyecto\\_hidroenergético\\_de\\_Salcca\\_Pucara\\_en\\_Perú\\_pdf](https://www.academia.edu/34354803/El_proyecto_hidroenergético_de_Salcca_Pucara_en_Perú_pdf)
- Santofimia, E., López-Pamo, E., Palomino, E. J., González-Toril, E., & Aguilera, Á. (2017). Acid rock drainage in Nevado Pastoruri glacier area (Huascarán National Park, Perú): hydrochemical and mineralogical characterization and associated environmental implications. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(32), 25243-25259. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0093-0>
- Schoolmeester, T., Johansen, K. S., Alfthan, B., Baker, E., Hesping, M., & Verbist, K. (2018). *The Andean Glacier and Water Atlas - The Impact of Glacier Retreat on Water Resources*. UNESCO & GRID-Arendal. <https://www.grida.no/publications/407>
- Segura, H., Espinoza, J. C., Junquas, C., Lebel, T., Vuille, M., & Garreaud, R. (2020). Recent changes in the precipitation-driving processes over the southern tropical Andes/western Amazon. *Climate Dynamics*, 54, 2613-2631. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05132-6>
- Sierra, J. P., Junquas, C., Espinoza, J. C., Segura, H., Condom, T., Andrade, M., Molina-Carpio, J., Ticona, L., Mardoñez, V., Blacutt, L., Polcher, J., Rabatel, A., & Sicart, J. E. (2022). Deforestation impacts on Amazon-Andes hydroclimatic connectivity. *Climate Dynamics*, 58(9-10), 2609-2636. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-06025-y>
- Somers, L. D., McKenzie, J. M., Mark, B. G., Lagos, P., Ng, G. H. C., Wickert, A. D., Yarleque, C., Baraër, M., & Silva, Y. (2019). Groundwater Buffers Decreasing Glacier Melt in an Andean Watershed—But Not Forever. *Geophysical Research Letters*, 46(22), 13016-13026. <https://doi.org/10.1029/2019GL084730>

- Soruco, A., Vincent, C., Rabatel, A., Francou, B., Thibert, E., Sicart, J. E., & Condom, T. (2015). Contribution of glacier runoff to water resources of La Paz city, Bolivia (16°S). *Annals of Glaciology*, 56(70), pp. 147-154. <https://doi.org/10.3189/2015AoG70A001>
- Vuille, M., Carey, M., Huggel, C., Buytaert, W., Rabatel, A., Jacobsen, D., Soruco, A., Villacis, M., Yarleque, C., Timm, O. E., Condom, T., Salzmann, N., & Sicart, J.-E. (2018). Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes – Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth-Science Reviews*, 176, pp. 195-213. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.09.019>
- Zimmer, A., Meneses, R. I., Rabatel, A., Soruco, A., Dangles, O., & Anthelme, F. (2018). Time lag between glacial retreat and upward migration alters tropical alpine communities. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 30 (October 2016), pp. 89-102. <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2017.05.003>