



Evaluación rápida del servicio ecosistémico de provisión de agua de los humedales altoandinos en la Cuenca del Rímac a la ciudad de Lima



© 2023 Fundación para la Conservación y el Uso Sustentable de los Humedales / Wetlands International

El contenido de esta publicación puede ser reproducido libremente para fines de educación, difusión y para otros propósitos no comerciales. Un permiso previo es necesario para otras formas de reproducción. En todos los casos se debe otorgar el crédito correspondiente a la Fundación para la Conservación y el Uso Sustentable de los Humedales / Wetlands International.

Esta publicación puede citarse como sigue: Gonnet, J.M. y A.A. Damian. 2023. Evaluación rápida del servicio ecosistémico de provisión de agua de los humedales altoandinos en la Cuenca del Rímac a la ciudad de Lima. C. Hegoburu y R.J. Baigún, editores. Programa Conservando los Humedales Altoandinos. Fundación Humedales / Wetlands International. Buenos Aires, Argentina.

ISBN 978-987-47431-9-0

Publicado por la Fundación para la Conservación y el Uso Sustentable de los Humedales / Wetlands International

Foto de tapa: Cordillera de la Viuda y Laguna Marcapomacocha por Jorge Gonnet.

Foto de contratapa: Vicuñas pastando en bofedales de Marcapomacocha por Alan Chamorro.

Diagramación: Marta Biagioli

El material presentado en esta publicación y las designaciones geográficas empleadas no implican opinión alguna de parte de la Fundación para la Conservación y el Uso Sustentable de los Humedales / Wetlands International sobre la situación legal de cualquier país, territorio o área, o en relación a la delimitación de sus fronteras.

Gonnet, Jorge

Evaluación rápida del servicio ecosistémico de provisión de agua de los humedales altoandinos en la cuenca del Rímac a la ciudad de Lima / Jorge Gonnet; Adán Damian; editado por Cecilia Hegoburu; Román Baigún; - 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires

Fundación para la Conservación y el Uso Sustentable de los Humedales, 2023.
Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online
ISBN 978-987-47431-9-0

1. Humedales. I. Damian, Adán. II. Hegoburu, Cecilia, ed. III. Baigún, Román, ed. ed. IV. Título.
CDD 577.6809

Evaluación rápida del servicio ecosistémico de provisión de agua de los humedales altoandinos en la Cuenca del Rímac a la ciudad de Lima

Informe técnico elaborado para el **Programa Conservando los Humedales Altoandinos para la Gente y la Naturaleza** de Wetlands International

Autores:

Jorge Gonnet y Adán Damian

Diciembre 2021

Resumen Ejecutivo

Lima Metropolitana es la segunda ciudad más grande del planeta situada en un desierto después de El Cairo en Egipto con más de 10,7 M de habitantes y una tasa de incremento poblacional del 1,2%. En la última década ha sufrido fuertes impactos negativos por el estrés hídrico; muchas familias carecen de agua para cubrir sus necesidades básicas de higiene y cocina, y presenta un déficit de abastecimiento en cada estación seca.

Frente al incremento poblacional de Lima Metropolitana, el gobierno del Perú se ha visto en la necesidad de aprovechar con mayor eficiencia las aguas de las cuencas de los ríos Chillón (7 m³/s), Rímac (31 m³/s) y Lurín (4 m³/s) sumando un total de 42 m³ de caudal promedio anual. Además, diques y acueductos de los "proyectos Marca I, III y IV" almacenan y trasvasan las aguas desde la cuenca alta del río Mantaro (de la vertiente amazónica en la región Junín y Pasco) hacia la subcuenca de vertiente pacífica de Santa Eulalia para tributar al río Rímac.

Sin embargo, estas infraestructuras no son suficientes por si solas para mitigar el creciente estrés hídrico. Esta infraestructura gris es abastecida con el agua que "proveen" los humedales de cabecera de cuenca, principalmente los bofedales y lagunas.

Los humedales altoandinos (bofedales y lagunas) regulan los caudales en las nacientes de las cuencas gracias a su capacidad de almacenar y retener agua durante la recarga en las estaciones de lluvias y erogarla gradualmente durante los períodos de sequía y estiaje. Además, los bofedales mejoran la calidad química del agua, controlan la cantidad de sedimentos y recargan los acuíferos subterráneos.

Estas funciones ecosistémicas de los humedales ubicados en cabeceras de cuencas estratégicas representan para la sociedad, servicios ecosistémicos hídricos cuya optimización contribuirá a un mejor rendimiento del agua hacia los valles del Rímac y hacia la ciudad de Lima. Por esta razón, se plantea la necesidad de incrementar las escalas de aplicación de políticas y acciones de conservación, de prevención de impactos, y de restauración o regeneración de estos ambientes claves de los Andes Centrales, de los que dependen las poblaciones locales hasta las zonas más bajas de ambas vertientes.

La presente "Evaluación rápida del servicio ecosistémico de provisión de agua de los humedales altoandinos en la cuenca del Rímac a la ciudad de Lima" aporta evidencias de estudios científicos sobre las contribuciones de los bofedales y los servicios ecosistémicos hídricos que proveen, muestra un primer recuento y mapeo de las superficies de estos humedales y lagunas en la subcuenca de Santa Eulalia (> 3.800 m s.n.m) y en el sistema Marcapomacocha I, III y IV. A modo de ejemplo, también se mencionan dos casos de impactos negativos significativos de las amenazas vigentes en estos ambientes.

Esta primera evaluación mapeó 14.811 ha de bofedales que representaron un 10,7% del área total de las subcuencas estudiadas por encima de los 3.800 m s.n.m. Las evidencias aportadas permiten postular la hipótesis de que los bofedales conforman la formación vegetal que más cantidad de agua aporta (un tercio) a la subcuenca Santa Eulalia y al sistema Marcapomacocha y, por tanto, a la ciudad de Lima.

Las potenciales amenazas para los humedales y los servicios ecosistémicos hídricos que proveen son: 1) presencia de contaminantes sobre fuentes de agua, provenientes de actividades mineras, 2) extracción agresiva de turba, lo cual reduce la capacidad de regulación hídrica y la disponibilidad de agua en temporadas de estiaje, 3) sobrepastoreo que altera la cobertura vegetal y reduce la capacidad de infiltración de lluvias para la recarga de acuíferos, 4) obras de infraestructura hidráulica que alteran los flujos naturales hidrológicos, lo que se traduce en regulaciones del agua forzadas y conflictos sociales, y 5) efectos del cambio climático, principalmente, la disminución de precipitaciones y el incremento de temperaturas.

Mitigar el estrés hídrico en la ciudad de Lima requiere un enfoque nuevo sobre la gobernabilidad del agua; y ésta, inevitablemente necesita revalorar la importancia de los servicios ecosistémicos hídricos que ofrecen los humedales altoandinos de la cuenca del río Rímac. Se recomiendan acciones inmediatas como el inventario y monitoreo de los bofedales y lagunas en las zonas de recarga del agua que abastece a Lima y los valles.

Introducción

Lima Metropolitana es una megalópolis con un grave estrés hídrico y es la segunda ciudad más grande del planeta en medio de un desierto después de El Cairo (Egipto). Tiene una población proyectada de más 10,7 millones de habitantes para el 2021, con una tasa de incremento poblacional del 1,2 % (INEI, 2018), lo que implica una creciente demanda de agua en una ciudad que nunca para de crecer.

La disponibilidad de agua por habitante es de 125 m³ al año, por debajo de los 1.700 m³ recomendados por la ONU. En un contexto de aumento de la desigualdad en el derecho de acceso al agua, cerca de 3 millones de habitantes no tienen acceso al agua potable, no cuentan con instalaciones de agua y/o sufren el encarecimiento de servicios alternativos como el aprovisionamiento en camiones cisterna.

Las proyecciones del Foro Económico Mundial (WEP) estiman que para el 2030 habría un colapso hídrico en Lima. Sin embargo, esta tendencia se ha acertado peligrosamente debido a la mala gestión y manejo del agua, la alteración de los ecosistemas que la regulan y el deterioro de la calidad de las reservas naturales del recurso.

Los altos cerros y cordilleras constituyen “trampas” del agua atmosférica que proviene de los anticiclones de los Océanos Atlántico y Pacífico. Una de las principales reservas estratégica de agua son los nevados de la cordillera de los Andes Centrales, en un franco proceso de retroceso de sus glaciares. Según la Cooperación Alemana para el Desarrollo, estos cuerpos de hielo podrían desaparecer para el 2045 (Gestión 2020).

Las proyecciones climáticas no son favorables. Los modelos de cambio climático predicen una disminución en las precipitaciones en la zona de recarga hídrica, los Andes Centrales, que se acentuará hacia finales del siglo XXI (Neukom *et al.* 2015, Morales *et al.* 2018).

Las funciones ecosistémicas de los humedales ubicados en cabeceras de cuencas estratégicas, como los bofedales de la cuenca del Rímac, representan para la sociedad, servicios ecosistémicos hídricos cuya optimización contribuirá a un mejor rendimiento en la provisión de agua hacia los valles del Rímac y la ciudad de Lima. Se plantea la necesidad de incrementar las escalas de aplicación de políticas y acciones de conservación, de prevención de impactos y de restauración o regeneración de estos ambientes claves de los Andes Centrales para garantizar la sustentabilidad para las poblaciones locales y de las zonas más bajas, tanto de la vertiente pacífica como la atlántica.



Laguna de Cuyo en Marcapomacocha. Alan Chamorro.

Importancia de la conservación y el mejoramiento de los humedales altoandinos

Las turberas incluyen parte de los bofedales y representan entre el 50 y el 70 % de los humedales del planeta y cubren más de 4 millones de km² o el 3 % de la superficie de agua dulce del mundo. En estos ecosistemas, se encuentra un tercio del carbono mundial almacenado en los suelos y el 10 % de los recursos de agua dulce (Joosten y Clarke 2002).

Los sistemas de humedales de la Puna y Altos Andes, como también los nevados y glaciares, cumplen un rol fundamental en la captación, la recarga, el almacenamiento, el aprovisionamiento natural de agua y la regulación de los flujos entre estaciones secas y húmedas. Cada punto ubicado aguas debajo del nivel de la Puna (3.800 m s.n.m.) depende de los procesos hídricos e hidráulicos de las zonas de recarga en las partes altas.

Hasta la fecha, la evidencia empírica sobre los aportes hídricos de los bofedales altoandinos hacia las partes bajas de las cuencas es escasa, y hasta antagónica para determinados procesos. Los estudios al respecto han mostrado diferentes respuestas sobre las contribuciones de estos ambientes al abastecimiento y regulación del agua, según las características de cada bofedal, la naturaleza geológica subyacente y la influencia del clima.

Según Holden (2005), determinadas turberas, en ciertas condiciones topográficas, influyen sobre los regímenes regionales de flujos mediante la interceptación de la escorrentía y el almacenamiento del agua de las tormentas, de modo que su efecto es la reducción de los picos de caudales. Esto depende del tamaño y la localización de la turbera en relación con la red de drenaje (Heathwaite 1995) y el período del año ya que, en la temporada húmeda, las turberas, por saturación, pueden tener menos capacidad de absorber agua y luego producir una regulación de los flujos durante la temporada seca (Ogawa y Male 1986).

Los bofedales altoandinos generalmente están ubicados donde el primer acuífero libre subterráneo alcanza la superficie y confluye con la escorrentía superficial (Gonnet *et al.* 2016), por lo que influyen positivamente en la regulación de los flujos hídricos hacia las zonas más bajas de la cuenca (Burt 1995). A su vez, las turberas y bofedales con congelamiento temporal tienen la capacidad de regular los flujos hídricos por más tiempo, influido por el descongelamiento gradual al final de la estación fría. Este proceso de almacenamiento en el hielo puede ocurrir a menor escala, entre días y noches con temperaturas que oscilen alrededor del punto de congelamiento (p. ej., Woo y Young 1998).

Los bofedales altoandinos, a pesar de las claras diferencias con las turberas del hemisferio Norte, tienen varias de las características mencionadas que pueden promover funciones claves en el ciclo del agua en el suelo y el subsuelo, almacenando importantes volúmenes de agua en los suelos orgánicos, y también, favoreciendo la percolación a niveles de acuíferos más profundos (lo que se conoce como erosión en tuberías en los sistemas de tuberías del suelo, según Holden 2005) constituyendo reservas de agua dulce.



Sistema de lagunas en Marcapomacocha usadas para el almacenamiento de agua para aprovisionar a la gran ciudad de Lima. Jorge Gonnet.

Los procesos ecosistémicos que caracterizan a los bofedales favorecen el rendimiento del agua en las cuencas que abastecen la ciudad de Lima. Es decir que, la provisión de agua a Lima depende del estado de conservación de los bofedales de altura. Entre los procesos más destacados se encuentran la formación de suelos orgánicos, la retención de sedimentos, el control de la erosión, la disminución de la energía de la escorrentía superficial, y la reducción de la evaporación.

Este trabajo tiene como meta aportar evidencias bibliográficas que demuestran los beneficios hídricos de los bofedales altoandinos de las cabeceras de las cuencas del río Rímac, más precisamente en las subcuencas del Sistema Marcapomacocha y de Santa Eulalia, para el abastecimiento de agua y regulación de caudales para la ciudad de Lima y los valles.

La provisión de estos beneficios hídricos radica en la conservación de los procesos ecosistémicos claves que mantienen a estos humedales, la prevención de impactos negativos y la restauración de situaciones de degradación.

Se plantearon los siguientes objetivos:

- 1) Describir el sistema de subcuencas Marcapomacocha-Santa Eulalia, que conforman una de las principales fuentes de agua de Lima;
- 2) mapear y cuantificar la superficie de los bofedales de estas subcuencas;
- 3) identificar beneficios hídricos de estos humedales; y
- 4) aportar evidencias de la pérdida de servicios ecosistémicos hídricos en bofedales degradados.



La extracción de turba es una actividad que se ha desarrollado a lo largo de muchos años en las zonas altas de la cuenca del Rímac. Alan Chamorro.

Las fuentes de agua de Lima: nevados, cochas y bofedales altoandinos

Lima se abastece de agua superficial de las cuencas de los ríos Chillón (7 m³/s), Rímac (31 m³/s) y Lurín (4 m³/s), siendo la cuenca del Río Rímac el aportante más importante de agua con el 74 % (ANA 2014). El 60% del caudal de la cuenca del río Rímac proviene de la subcuenca Santa Eulalia. Esta subcuenca está subsidiada por agua del trasvase de las nacientes de otras subcuencas que tienen pendiente hacia el Amazonas (vertiente atlántica). Estos trasvases se realizan a través de un conjunto de obras hidráulicas (diques en lagunas naturales y acueductos) denominadas "Sistema Marcapomacocha" (o proyectos "Marca") que conectan el complejo de lagunas en Marcapomacocha, Junín con la subcuenca de Santa Eulalia (pendiente pacífica) que abastece al río Rímac (SEDAPAL 2017).

El caudal promedio anual del Rímac (incluyendo las derivaciones) es de 27 a 34 m³/s equivalente a unos 850 Hm³ (hectómetros cúbicos) anuales. Posee un régimen estacional con caudales bajos y fuerte estrés hídrico en temporada de estiaje, y caudales altos y deslizamiento de lodo y escombros causados por las fuertes lluvias o desbordes de lagunas (huaycos) durante la temporada de lluvia. Lima recibe, además de las aguas superficiales, 174,45 Hm³ de aguas subterráneas al año. El aporte hídrico de esta ciudad, en su conjunto, es destinado en un 80% para uso poblacional, 17% uso agrícola, 2% en minería, 0,2% industrial y 0,8% para otros usos.

El Sistema Marcapomacocha

Consiste en una serie de diques que represan lagunas o cochas naturales de la vecina subcuenca alta del río Mantaro (cuenca del Amazonas), desde las que se trasvasa un importante caudal por acueductos y el túnel transandino de Cuevas–Milloc, cuyo aporte promedio es de 143 Hm³/año (Plan Maestro de los Sistemas de Agua Potable y Alcantarillado [Tomo I], SEDAPAL 2014) a la subcuenca Santa Eulalia de la cuenca del río Rímac. Este sistema es administrado por la empresa del agua SEDAPAL S.A. (Bernex 2019). Además, esta subcuenca produce el 70% de energía para Lima a través de las empresas hidroeléctricas de Callahuanca, Huinco, Huanza y Carhuac (SUNASS 2018).

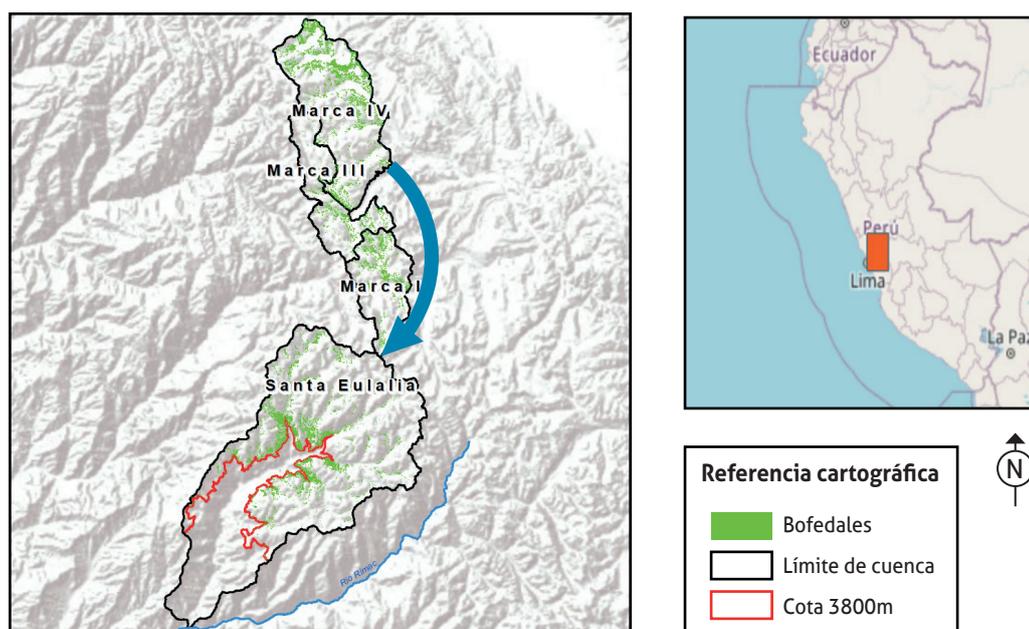


Figura 1. Ubicación geográfica de los proyectos de embalse, acueducto y trasvase Marca I, III y IV (vertiente atlántica) y la subcuenca de Santa Eulalia (vertiente pacífica) de la cuenca del río Rímac que abastecen el 74 % del agua a la ciudad de Lima. En verde se destacan los bofedales altoandinos (por encima de los 3.800 m s.n.m.). La flecha azul muestra el sentido general de los flujos hacia la subcuenca de Santa Eulalia desde los trasvases de las cuencas atlánticas. (Fuente: elaboración propia).

El Sistema Marcapomacocha fue construido en tres etapas: 1) en 1965 se iniciaron los trasvases del proyecto Marca I; 2) en 1997 las derivaciones del proyecto Marca III; y 3) en 2012 comenzó a operar el proyecto IV (Marca II y V aún no se implementan). Marca IV tributa sus aguas al proyecto Marca III y éste al Marca I, desde donde se trasvasa mediante canales y el túnel trasandino a la subcuenca de Santa Eulalia como se muestra en la Figura 2.

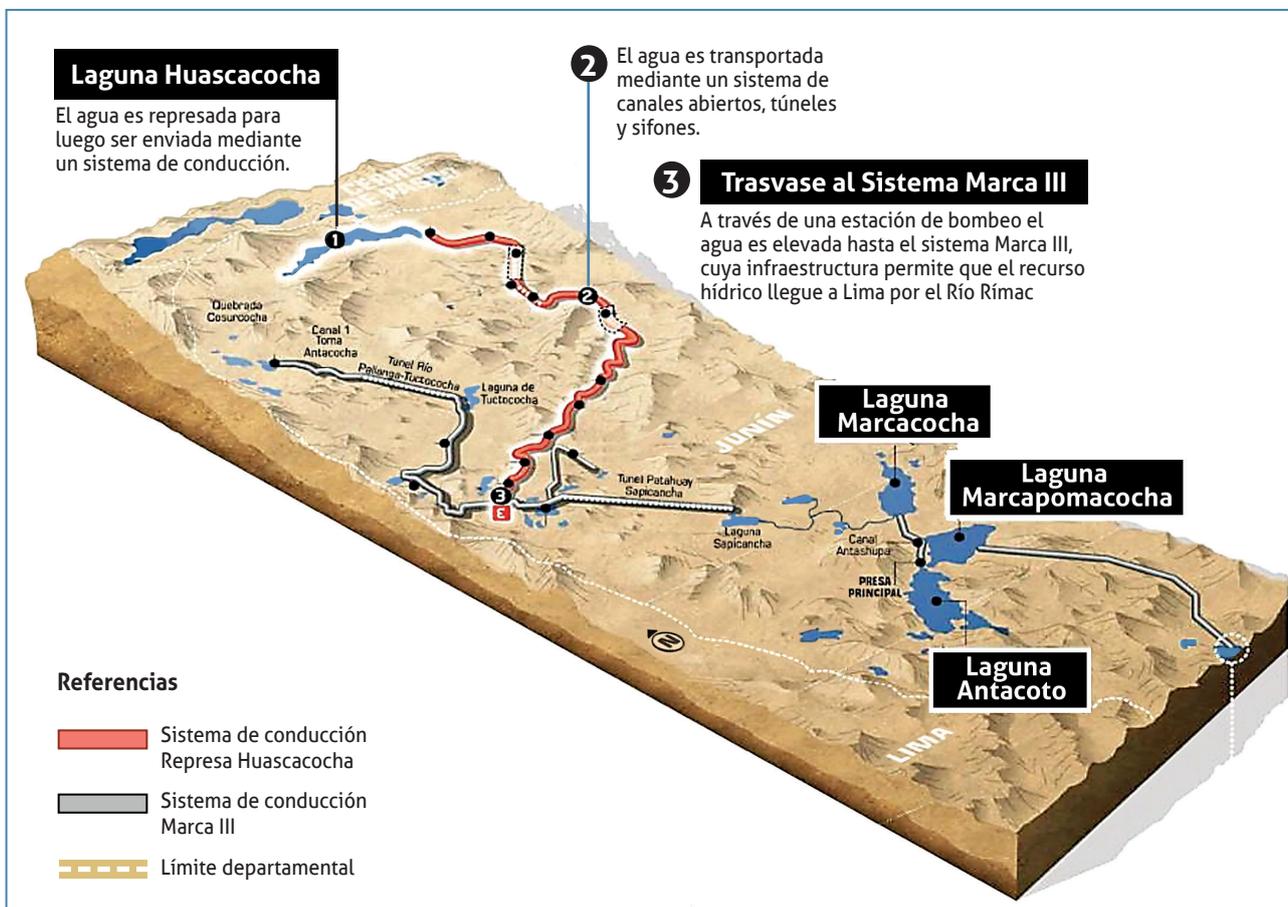


Figura 2. Esquema de funcionamiento del Sistema Marcapomacocha de embalses y conducción de agua. Fuente y elaboración: Solano Castillo (2015).

El sistema Marcapomacocha (Marca I, III y IV) abarca 94.100 hectáreas en la cuenca alta del río Mantaro. Comprende el represamiento de hasta 280 Hm³ de agua en 6 lagunas: Antacoto, Huascacocha, Marcapomacocha, Marcacocha, Sangrar y Tuco. Estos sectores de las cuencas y los humedales, importantes en el aporte y regulación de los caudales, se localizan en los distritos de Marcapomacocha y Santa Bárbara de Carhuacayán en la provincia de Yauli y en el distrito de Huayllay en la provincia de Pasco (Tabla 1).

En el periodo 2011–2012, las reservas del sistema Marcapomacocha alcanzaron su total capacidad de almacenaje histórico con 280 Hm³ (Andina 2011). Estas acciones de embalse y conducción del agua han permitido incrementar la capacidad de almacenamiento hídrico en la cuenca del río Rímac, pero con un alto costo ambiental que no ha sido evaluado a través de estudios de impacto ambiental integrales y completos. Entre los impactos negativos hipotéticos de la derivación del agua se pueden mencionar la alteración de la dinámica natural de recarga del agua en el sistema subterráneo y la afectación de los escurrimientos con merma de caudales en las cuencas intervenidas.

La subcuenca de Santa Eulalia posee una extensión de 107.737 ha y un cauce principal de 69 km abarcando desde las estribaciones occidentales de la cordillera de los Andes hasta la localidad de Chosica (Andina 2011). Se alimenta naturalmente de dos subcuencas: Macachaca y Sacsá. Abarca 10 distritos políticos de la provincia de Huarochirí, departamento de Lima (Tabla 1). Las acciones de conservación de las cabeceras de cuencas para la optimización de los servicios ecosistémicos hídricos demandan el acuerdo de todos los distritos políticos en donde se recarga el agua que abastece a Lima y los valles.

Tabla 1: Distribución política del área de estudio y superficie de cada subcuenca de trasvase del sistema Marca y de la subcuenca de Santa Eulalia que abastecen al río Rímac. (Elaboración propia).

Área de estudio (de N a S)		Distritos (orden alfabético)	Provincia	Departamento	Área		Vertiente
					ha	%	
Marcapomacocha	Marca IV	- Huayllay - Santa Bárbara de Carhuacayán	Yauli y Pasco	Junín y Pasco	31.469	19%	Océano Atlántico
	Marca III	- Marcapomacocha - Santa Bárbara de Carhuacayán	Yauli	Junín	15.139	9%	
	Marca I	- Marcapomacocha	Yauli	Junín	14.487	9%	
Santa Eulalia		- Callahuanca - Carampoma - Huachupampa - Huanza - San Antonio - Santa Eulalia - San Juan de Iris - San Mateo de Otao - San Pedro de Casta - San Pedro de Laraos	Huarochirí	Lima	107.737	63%	Océano Pacífico

En contraste con su gran potencial para el suministro de agua (aporta el 60% de agua del río Rímac que abastece Lima y los valles) y energía, la subcuenca del río Santa Eulalia muestra niveles muy altos de pobreza, desigualdad e inseguridad hídrica, alimentaria y energética. Además del aumento de vulnerabilidad por efectos del cambio climático (Schoolmeester *et al.* 2016). Esta subcuenca es vital para la sobrevivencia de la ciudad de Lima y existe un fuerte interés de empresas hidroeléctricas y de abastecimiento de agua para trabajar el mejoramiento de la gobernabilidad del agua a través de la Gestión Integral de Recursos Hídricos (GWP 2014).

Humedales altoandinos: lagunas y bofedales del Sistema Marcapomacocha I, III, IV y subcuenca de Santa Eulalia

Las lagunas son reservorios naturales de agua. Las lagunas de las subcuencas del sistema de trasvase Marca y de Santa Eulalia totalizaron 8.473 ha en la temporada húmeda y 7.373 ha en la temporada seca. Los espejos de agua de las subcuencas del sistema Marca representaron un 86 % de la superficie media del total de espejos de agua entre temporadas, mientras que los de Santa Eulalia compusieron el restante 14 % (Tabla 2).

Tabla 2: Superficie (ha) de los espejos de agua entre temporada seca y húmeda de las subcuencas de Marcapomacocha y Santa Eulalia que aportan agua al río Rímac. (Elaboración propia).

Subcuenca	Superficie de los espejos de agua (ha)	
	Temporada húmeda	Temporada seca
Marcapomacocha	7.219	6.339
Santa Eulalia	1.254	1.034
Total	8.473	7.373

La superficie estimada¹ de bofedales de las 4 subcuencas fue de 14.811 ha, lo cual representa el 10,7 % de la superficie total de tierras de la ecorregión de Puna por encima de los 3.800 m s.n.m (Tabla 3).

Tabla 3: Superficie estimada de bofedales (ha) en buen estado de conservación por cada subcuenca que abastecen un 60 % del caudal anual del río Rímac. (Elaboración propia).

Subcuenca	Superficie de bofedales (ha)	Proporción por subcuenca (%)
Santa Eulalia	6.422	8,3 (*)
Marca I	1.710	11,8
Marca III	1.011	6,7
Marca IV	5.218	16,6
Área total (ha)	14.811	10,7

(*): Proporción sobre el área total de la subcuenca por encima de los 3.800 m s.n.m. que abarca 77.009 ha.

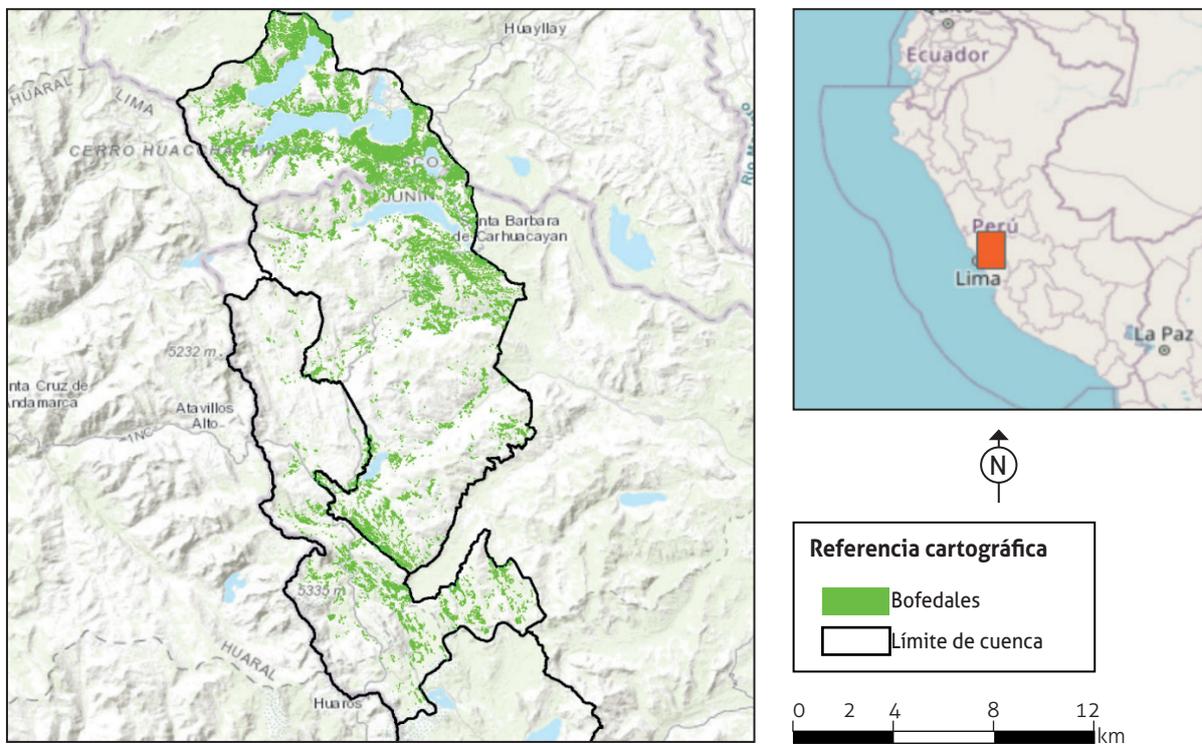


Figura 3. Distribución de los bofedales de las subcuencas del sistema Marca III y IV, de norte a sur, aportantes hídricos del río Rímac (Fuente: elaboración propia)

¹ Los bofedales fueron mapeados mediante análisis de imagen Sentinel de fecha de abril de 2020. Se ajustó un valor de corte de NDVI = 0,62 para diferenciar los bofedales del resto de vegetación zonal.

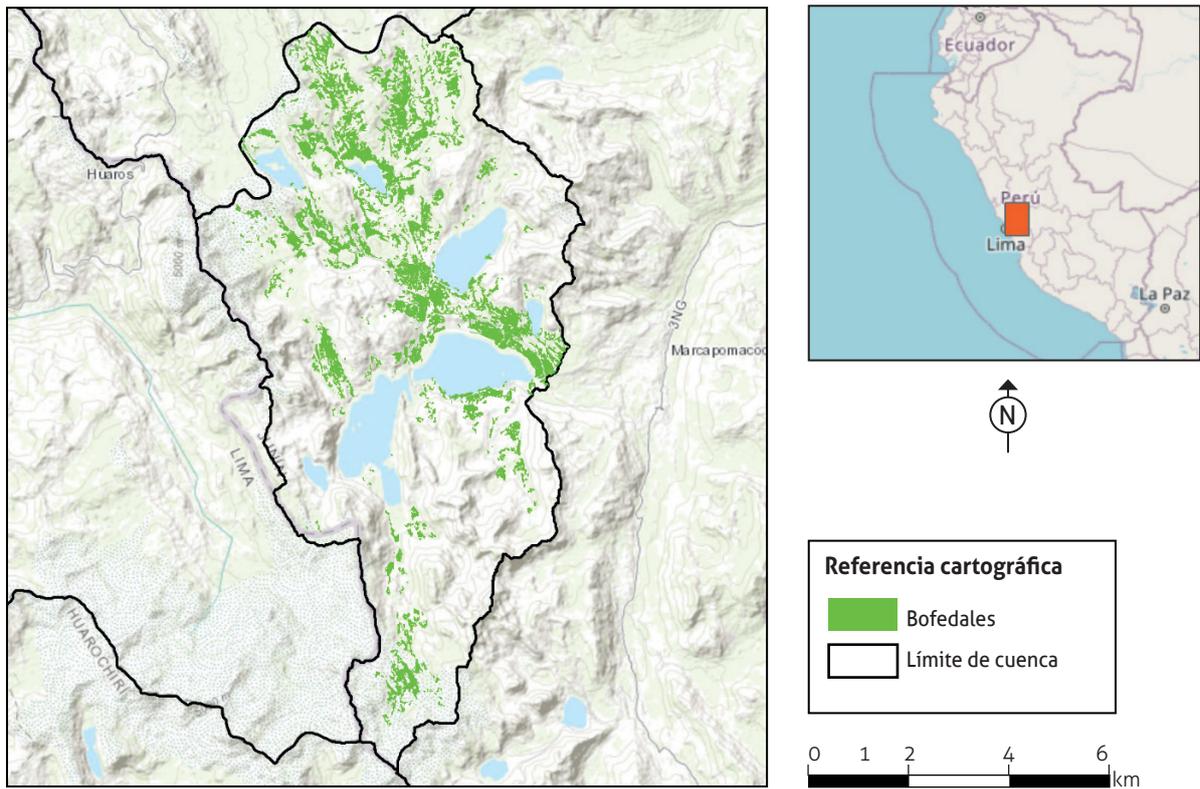


Figura 4. Distribución de los bofedales de la subcuenca del sistema Marca I, aportante hídrico del río Rímac (Fuente: elaboración propia)

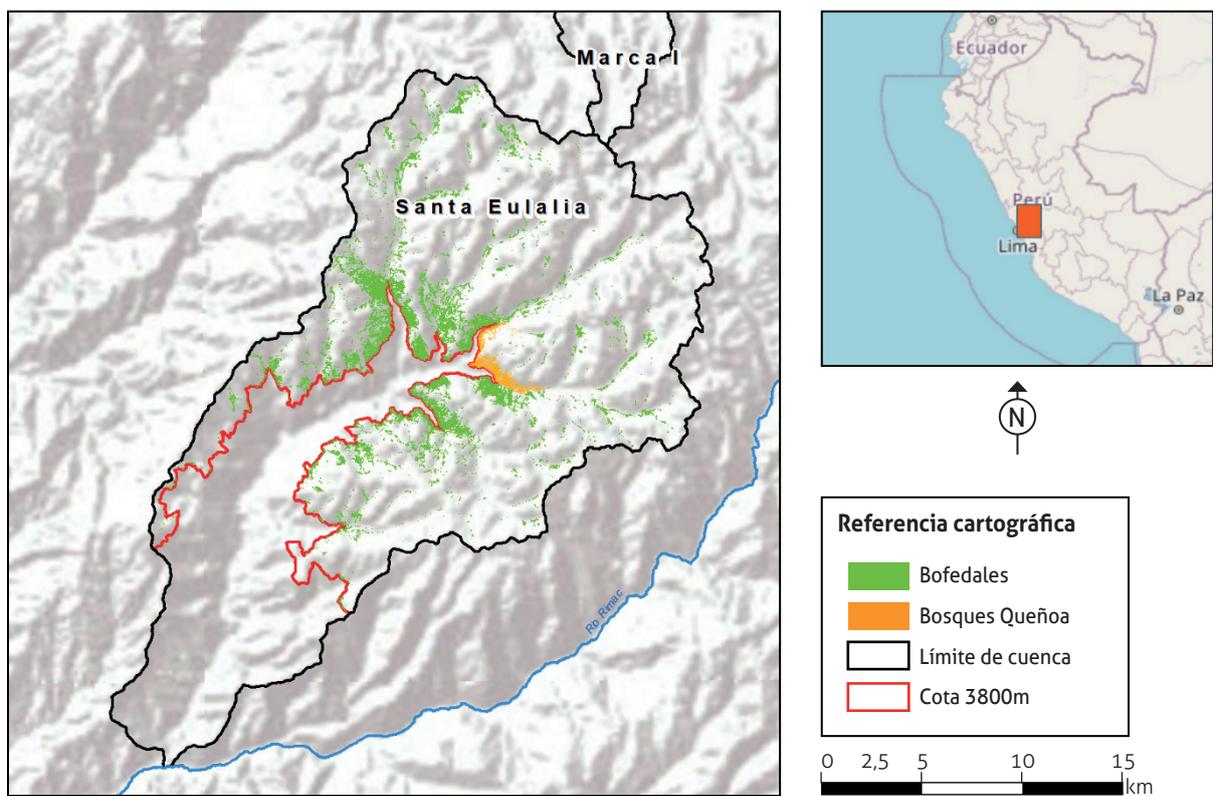


Figura 5. Distribución de los bofedales en la subcuenca de Santa Eulalia (por encima de los 3.800 m s.n.m.) correspondiente a la cuenca del Rímac. (Fuente: elaboración propia).

Beneficios hídricos de los bofedales altoandinos

La Convención sobre los Humedales de Importancia Internacional (o Convención de Ramsar) (2015) distingue, para los humedales altoandinos, la provisión de cinco grupos principales de servicios ecosistémicos: 1) rendimiento hídrico, 2) regulación hídrica, 3) mejora de la calidad química del agua, 4) control de sedimentos, y 5) recarga de acuíferos. Esta sección describe los beneficios hídricos que brindan los bofedales altoandinos de las subcuencas de trabajo.

Rendimiento hídrico

El rendimiento hídrico es la capacidad que tienen los ecosistemas de “producir” agua en la cuenca. El indicador del rendimiento hídrico es el caudal medio anual que se registra en la fuente (río) y depende de factores como: la precipitación media anual, la evapotranspiración media anual, y la infiltración profunda (Acosta Sullcahuaman *et al.* 2018).

Las principales fuentes de agua que abastecen a Lima se recargan en las zonas altas de Puna gracias a la presencia de cordilleras, glaciares, suelos porosos y humedales contenidos en las microcuencas altas. Además, en las tierras altas ocurren mayores precipitaciones que en las zonas bajas. Como evidencia del mayor rendimiento hídrico de las zonas altas se pueden mencionar los caudales específicos en la cuenca del río Rímac que van desde un mínimo de 0,0 l/s/km² en las microcuencas cercanas a la costa, hasta valores de 12,6 l/s/km² en la microcuenca del río Pucara y un máximo de 21,8 l/s/km² en la microcuenca de la laguna Huascacocha, ambas en la cuenca Alto Mantaro. En esta última microcuenca se asienta el Proyecto Marca IV (Observatorio del Agua 2019).

Este patrón pone en valor la importancia de los humedales altoandinos y su rendimiento hídrico en la provisión de agua a la ciudad y los valles agrícolas de zonas bajas. Sin embargo, este ecosistema sufre presiones antropogénicas como los excesivos movimientos de suelo por diversos factores como la minería, las obras de conducción del agua y las carreteras, entre las principales causas además de la extracción clandestina de turba, el desecamiento de bofedales mediante canales, el sobrepastoreo y sobrepisoteo.

Estas presiones tienen un evidente impacto sobre el estado ecológico de los bofedales poniéndose en riesgo los servicios ecosistémicos que proveen. La adecuada evaluación de los impactos de estas obras y actividades posibilitará la planificación o evitación de las mismas de acuerdo a la valoración, conservación y manejo restaurativo de los humedales, los cuales, entre bofedales y lagunas, ocupan un 17 % de la superficie de las cuencas altas de Santa Eulalia y del sistema Marca y conforman la mayor parte del rendimiento hídrico que abastece a Lima y los valles inferiores.

Regulación hídrica

La regulación hídrica depende de la intensidad de la precipitación (a menor intensidad, mayor infiltración), de la cobertura vegetal (a mayor cobertura, mayor infiltración) y de la profundidad del suelo superficial (a mayor profundidad de turba o suelo orgánico, mayor capacidad de almacenamiento de agua). La presencia de humedales en cabeceras de cuenca tiene beneficios directos sobre la disponibilidad de agua en temporada de estiaje al retardar la escorrentía superficial de un sistema lótico a uno léntico y promover la infiltración y el almacenamiento de agua en los suelos orgánicos (Céleri *et al.*, 2010).

En línea con lo dicho anteriormente, Valois *et al.* (2020), en un estudio reciente sobre un bofedal de los Altos Andes de Chile, concluyen que estos ambientes son grandes reservorios de agua. Cooper *et al.* (2010) determinaron que los niveles de la capa freática de los bofedales en los Andes Centrales de Bolivia y de

Perú fueron relativamente estables durante la temporada húmeda, ubicándose dentro de los 20 cm de la superficie del suelo, mientras que en la época seca las capas de agua se encontraron entre los 40 y 90 cm por debajo de la superficie. Esta bajante del nivel freático de los bofedales, entre la temporada húmeda y la seca, evidencia la retención del agua y el posterior aporte a Lima y los valles bajos en la época hídrica desfavorable.

Los humedales, tales como los bofedales y las turberas, gracias a las características de sus suelos orgánicos, promueven la retención temporal de agua en la época de lluvia y su erogación retardada en período de estiaje. Este almacenaje de agua, sumado a los procesos de infiltración o percolación profunda, pueden “producir” agua para la cuenca en períodos de déficit (Holden 2005).

La revisión de Holden (2005) pone en evidencia las siguientes características propias de humedales, como turberas nórdicas y bofedales altoandinos, que promueven la función de regulación hídrica:

- 1) Se desarrollan en sectores donde la capa freática alcanza la superficie;
- 2) Sus suelos no saturados al final de la temporada de estiaje tienen la capacidad de absorber y almacenar parte de la escorrentía y precipitaciones;
- 3) Sus suelos orgánicos permiten una erogación gradual de los caudales retenidos;
- 4) Su suelo y subsuelo con erosión en “tuberías” (procesos de *piping*), macroporos o cierta porosidad que, al ser suelos muy orgánicos, permite un buen almacenamiento de agua (porosidad útil). El basamento rocoso con carbonatos de calcio es dominante en las altas cuencas de Marcapomacocha (Miramira *et al.* 2016) y promueve este tipo de erosión por dilución;
- 5) Están ubicados en tierras altas con congelamiento estacional del agua y de los horizontes superficiales saturados, almacenándola en forma de hielo, y suministrándola de forma regulada o más lenta hacia la cuenca al final de la época de estiaje que coincide con el comienzo de primavera, es decir, con el incremento gradual de las temperaturas (Gonnet *et al.* 2016).

El almacenamiento del agua en el bofedal representa un servicio ambiental que está favorecido por el mayor contenido de materia orgánica (carbono) y su capacidad de retención (Buytaert *et al.* 2006, Gómez Portal 2016), potenciando el valor local del servicio de provisión de agua en las poblaciones locales. Por otra parte, el servicio de almacenamiento de agua y su consecuente regulación tiene mayor peso para las poblaciones regionales, ciudades y otros usuarios del agua en la parte baja de la cuenca (Castro Méndez *et al.* 2021).

Los bofedales de las altas cuencas del Mantaro y de Santa Eulalia están dominados por *Distichia muscoides* y otras especies vegetales gramíneas que desarrollan suelos esponjosos de alto contenido de materia orgánica (Maldonado Fonken 2014). Giraldo Araujo (2016) encontró valores muy bajos de densidad aparente del suelo de 0,113 g/cm³, en bofedales de *Distichia muscoides*, lo cual se relaciona con un alto contenido de materia orgánica y con la capacidad para absorber importantes cantidades de agua (Giraldo Araujo 2016).

En bofedales con suelos más compactados y sobrepastoreados, que se relacionan con una mayor dominancia de *Plantago rigida*, los valores de densidad aparente son 8 veces mayores (0,871 g/cm³) que en bofedales más sanos de *Distichia muscoides*, por lo que este tipo de disturbios reduce, en esta misma proporción, su capacidad de absorción y saturación de agua (Giraldo Araujo 2016). Un uso más sustentable de las pasturas y la evitación de la compactación y movimientos de suelo por obras y actividades humanas podrían contribuir a una mejor regulación de caudales por los bofedales (Ochoa-Tocachi *et al.* 2016).

El coeficiente de conductividad hidráulica representa la velocidad promedio del flujo subterráneo a través del medio poroso saturado que compone el acuífero y sobre la cual influyen las propiedades del fluido, el tamaño de poros y granos del suelo, su textura y su estructura o empaquetamiento. Soliz (2011) reporta valores de porosidad de 0,70 g/cm³ y conductividad hidráulica de 0,01 m/día para un bofedal del altiplano boliviano, similares a los de las cuencas de estudio del alto Rímac.

Los valores tan bajos de conductividad hidráulica demuestran la lentitud de avance del agua por los bofedales, situación que guarda relación con el concepto de acuitardo², y posiblemente con el alto contenido de materia orgánica que se encuentra en diferentes etapas de degradación, y con la textura de suelo arcillo limoso. Esta baja capacidad de movimiento del agua favorece el almacenamiento en detrimento de la escorrentía en el suelo.

² Acuitardo: formación geológica que almacena agua, a veces en grandes cantidades, pero que circula y transmite con dificultad.
Fuente: <http://www.cgsingenieria.com/glosario>

Recarga de acuíferos

La recarga de acuíferos es la entrada de agua en un acuífero (zona saturada del suelo) que comienza a formar parte de las reservas subterráneas. Esta entrada puede darse de dos maneras, por un movimiento descendente del agua debido a las fuerzas de gravedad o por un movimiento horizontal del flujo debido a las diferentes condiciones hidráulicas de las capas que constituyen el perfil del suelo (Solano Castillo 2015). Esta capacidad forma parte del ciclo hidrológico, se genera debido a la precipitación, y es un proceso largo en duración y limitado a la capacidad del acuífero.

El proceso de infiltración y percolación profunda está favorecido por la erosión en tuberías (Holden 2005) que se puede dar en zonas de basamento rocoso de carbonatos característicos en las cuencas de estudio. El retardo y almacenamiento de agua por los bofedales permiten mejores índices de infiltración, además de la retención paulatina de caudales más estables para la percolación subterránea (Adauro y Willems 2016).

El estudio realizado por Observatorio del Agua (2019) indica que la recarga de acuíferos de la cuenca del río Rímac se inicia con la recarga del acuífero de la parte alta de la cuenca a través del proceso de percolación de una parte de la precipitación ocurrida en esta zona. El agua percolada incrementa el volumen del acuífero, y parte de este volumen es entregado a los ríos contribuyendo a la porción correspondiente del caudal base. La parte restante es derivada hacia el "Acuífero Lima" contribuyendo a su recarga. La recarga acuífera se estima en 181,2 Hm³/año de los cuales: 34,7 Hm³/año (19%) proviene de la recarga a través del cauce del río Chillón, 126,2 Hm³/año (70%) proviene de la recarga a través del cauce del río Rímac y 20,2 Hm³/año (11%) proviene mediante conexión hidráulica del acuífero "Alto Rímac".

La fluctuación del nivel freático en los bofedales evidencia su capacidad de almacenar y regular caudales hacia las zonas de valles y la ciudad de Lima, a la vez que se requiere un plan activo de conservación de estos humedales altoandinos y de su uso sustentable en vistas de que todo impacto negativo sobre ellos sólo producirá mayor déficit en los períodos de sequía.

Control de sedimentos y regulación de la calidad del agua

El control de sedimentos es la capacidad de un sistema natural o artificial de amortiguar el golpe de la gota de lluvia y de la energía de la escorrentía, que evita la erosión del suelo y la producción de sedimentos. Los bofedales poseen una cobertura vegetal cercana al 100% y una densa red de raíces, lo cual evita la erosión del suelo, a la vez que retiene sedimentos que acarrea el agua (Acosta Sullcahuaman *et al.* 2018, Jiménez García 2018).

Esta capacidad de reducir los sólidos en suspensión se ha descrito para los bofedales de Huaraz (Perú) por la empresa prestadora de Agua potable EPS CHAVIN S.A., cuyo estudio demostró que el agua, luego de atravesar el bofedal Auqui, ve reducida significativamente su concentración de sedimentos (García Chávez 2019).

Además de las mejoras en las características físicas de las aguas debida a los bofedales, hay estudios que han demostrado mejoras en la calidad química de las aguas. En el bofedal de la comunidad Rosaspata (36,4 ha), ubicado en la provincia de Huamanga, región Ayacucho (Perú) a 4.350 m s.n.m. comprobaron la disminución de concentraciones de metales pesados en los caudales de salida del bofedal (Gómez Portal 2016). De igual manera se demostró esta capacidad depuradora de la calidad de agua por el bofedal del sistema léntico de Puquios en donde el nivel de los metales pesados de salida resultó menor a los de entrada (Johnston 1991, Pérez-Olmedilla *et al.* 2000, Armijo León 2015).

Es claro que los bofedales adquieren importancia para el servicio de mantenimiento de la calidad de agua ya que reducen los gastos de potabilización y la carga de contaminantes mineros (SUNASS 2018).

Importancia de la conservación de los humedales para optimizar el balance hídrico de los bofedales altoandinos

A pesar de los esfuerzos por construir embalses adicionales y transportar agua desde Junín y Pasco, Lima enfrenta un déficit promedio de 3,05 m³/s de caudal anual (42,84 Hm³ de volumen anual, equivalente al 5% del caudal promedio anual del Rímac) durante la estación seca (mayo a diciembre). Durante la estación lluviosa, Lima goza de un superávit de agua tanto así que, con tan solo el 2% de excedente de esta temporada podría cubrir el déficit de la temporada seca (Gammie y De Bievre 2019).

La Tabla 4 muestra que, en julio, el mes más seco para el Rímac-Alto Mantaro, el déficit del caudal promedio de las cuencas es de 0,86 m³/s. Este déficit hídrico resulta especialmente crítico para la población de Lima, cuya planta de tratamiento, SEDAPAL, que es la más grande del servicio de agua de la ciudad, es abastecida por el río Rímac. En agosto, septiembre y octubre los caudales son tan bajos que prácticamente se agotan después que se retira agua para usos agrícolas.

Tabla 4: Excedente y déficit (valores negativos) promedio del caudal (m³ /s) para las aguas que provee el río Rímac a la ciudad de Lima. (Fuente: Nippon Koei LAC - 2011).

Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Caudal excedente o deficitario (m ³ /s)	16,51	30,86	34,49	18,70	3,48	0,08	-0,86	-0,53	-0,55	0,00	1,86	6,48

La Figura 6 ilustra el carácter estacional del agua. Existe suficiente cantidad para satisfacer la demanda de agua en Lima; sin embargo, gran parte del excedente en la estación lluviosa fluye al océano, evidenciándose serios problemas de regulación hídrica. *“Es aquí donde los bofedales son una importante alternativa para el almacenamiento y regulación de las lluvias para la temporada seca, funcionando como esponjas de agua en las cabeceras de cuenca; se vincula que un 60% del caudal retenido en la temporada seca es por la regulación de los bofedales”* (INAIGEM 2018). Por otra parte, la importancia de los bofedales también radica en el costo de inversión para su protección, conservación y manejo que son significativamente menores frente a costos de infraestructura gris que buscan la regulación hídrica.

Las evidencias señalan que los bofedales ofrecen una importante alternativa de regulación hídrica, almacenan el agua de lluvia y la van suministrando gradualmente en temporada seca.

Además, el basamento rocoso dominante en las cuencas altas de Marcapomacocha y asociado a los bofedales promueve la erosión en tuberías por dilución, lo que favorece el movimiento vertical del agua desde y hacia el subsuelo mediante percolación. Esto contribuye al almacenamiento del agua a diferentes niveles de profundidad y su disposición en las zonas bajas y en el agua subterránea de los principales colectores.

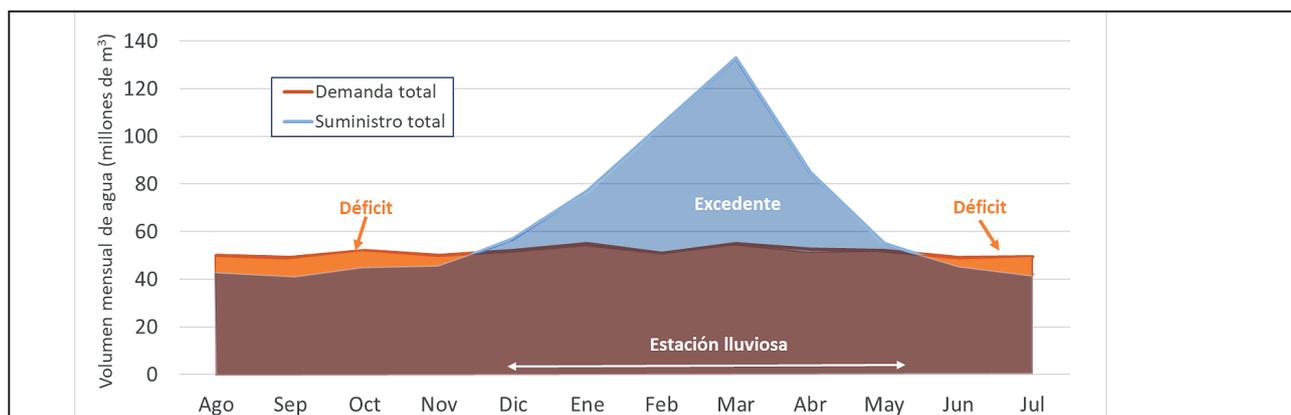


Figura 6. Suministro y demanda de agua en la cuenca del río Rímac. (Fuente: Ministerio de Agricultura del Perú -2010).

Pérdida de servicios ecosistémicos hídricos en los bofedales ante escenarios de degradación

En esta sección, se presentan dos ejemplos de degradación de humedales en las subcuencas de trabajo: uno referido a la laguna Canchis y el bofedal de Millo (Comunidad de Milloc) en la cuenca alta de Santa Eulalia; y el otro, en el bofedal de la pampa de Sapicancha (Comunidad de Yantac) y la laguna homónima en la subcuenca del sistema Marca I.

Si bien existen numerosas situaciones de procesos de deterioro de humedales en las subcuencas de estudio, los casos seleccionados que aquí se exponen, conforman dos muestras representativas que incluyen procesos con diferentes causas de erosión y pérdida de suelo de humedales, colmatación de lagunas, sepultamiento de bofedales, y hasta contaminación química de las aguas.

Los movimientos de suelo descontrolados y la erosión facilitada producen el acarreo de sedimentos desde los taludes desestabilizados. La alta carga de sedimentos resultante produce el embanque en las lagunas o cochas y la pérdida de capacidad de almacenamiento de agua. Una rápida estimación del volumen de sedimentos generados por procesos de erosión, aguas arriba de las lagunas de Sapicancha, Marcapomacocha y Canchis (descendiendo en altitud) resulta en 1 Hm^3 . Este volumen es equivalente a lo que se pierde de capacidad de almacenamiento de agua durante el tiempo en el que no se restauren dichos impactos.

Estos procesos de erosión continúan activos, por lo que cada año aumenta la carga de sedimentos, de manera acelerada, en los reservorios de agua y se pierde capacidad de almacenamiento de agua, más allá de los problemas de contaminación de las aguas como en la laguna Canchis (Figuras 7 y 8). Junto con este impacto negativo, se suma la pérdida de áreas de bofedales con la consecuente reducción de los servicios ecosistémicos hídricos que aportan.

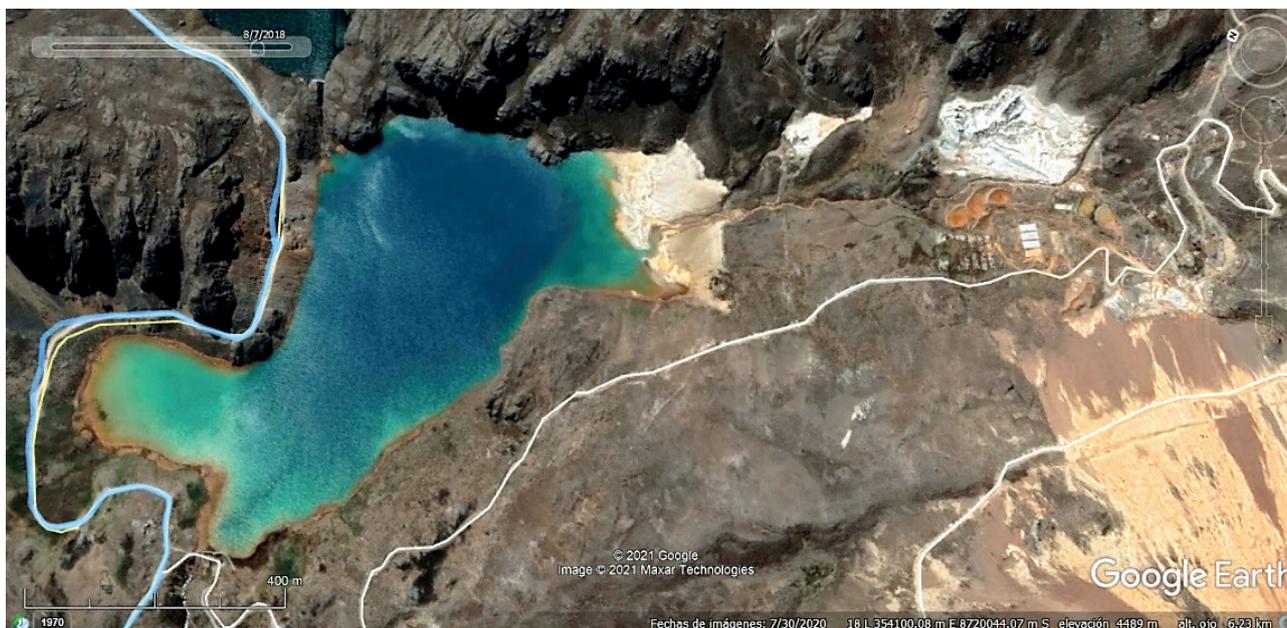


Figura 7. En la parte superior derecha de la imagen satelital se evidencian, en las zonas blancas, movimientos de suelo por las instalaciones de una mina, además de erosión y desestabilización de taludes. Esto provoca el embanque de más de 250.000 m^3 de material en la laguna Canchis (sedimento blanquecino en la parte este de la laguna) con contaminación de aluminio, cadmio y manganeso, entre los principales pasivos físicos y contaminantes, derivada del aporte de material de bocamina y relaves (ANA 2012).



Figura 8. Situaciones de deterioro de humedales, lagunas y bofedales, en la cuenca alta de Santa Eulalia, que abastece de agua a la ciudad de Lima. Los círculos rojos muestran un acercamiento del bofedal totalmente degradado de Milloc, aparentemente por contaminación química proveniente de la laguna Canchis y transportada por el agua subterránea y superficial.

Dentro de la subcuenca de Marca I, más precisamente en la salida del túnel N° 5, cuyas aguas drenan hacia la Laguna Sapicancha, en la Comunidad de San Francisco de Asís de Yantac, se observa erosión del suelo del bofedal de Pampa Sapicancha, desestabilización de taludes y arrastre de sedimentos hacia la laguna homónima, con la consecuente pérdida de capacidad de almacenamiento de agua (Figura 9).



Figura 9. La imagen superior muestra una vista en planta de las afectaciones por la salida del túnel N° 5 (a la izquierda) y su canal de desembocadura en la laguna Sapicancha (a la derecha). La foto central muestra un detalle de los taludes desestabilizados y la erosión retrocedente por el incremento de los caudales en el río natural y la falta de obra gris para evitar la pérdida de suelos y aceleración de las escorrentías en la pampa Sapicancha, cuyos detalles de la degradación se muestran en las fotos inferiores. Los círculos rojos señalan los parches de bofedales en proceso de deterioro.

Recomendaciones

Este documento aporta evidencias sobre la importancia de la conservación de los bofedales y demás humedales que forman parte de las fuentes de recarga de agua y regulación de caudales, escorrentías y flujos subterráneos hacia los valles y la ciudad de Lima.

Incluso la conservación del estado natural de los humedales es prioritaria en la provisión de agua a Lima y demás ciudades bajas debido a que las grandes obras de infraestructura gris existentes dependen de la sanidad de las cuencas y de los procesos ecosistémicos claves de los nevados y bofedales para que su operatividad sea óptima.

Las tendencias climáticas generadas por el cambio global vaticinan menor disponibilidad de agua de las precipitaciones y de los glaciares, por lo que las obras de embalses y acueductos perderán aún más relevancia frente a estos escenarios y, por sí solas, no alcanzarán para paliar el déficit hídrico de Lima. En cambio, el funcionamiento óptimo de embalses y acueductos requerirá de políticas estrictas de protección de las cabeceras de cuencas y sus humedales, como lagunas y bofedales.

Es claro que se requieren estudios más completos de los balances hídricos por subcuencas y por sistemas de humedales (lagunas y bofedales) que incorporen los flujos subterráneos, lo cual posibilitará una mejor administración de los servicios ecosistémicos hídricos y la toma de decisiones.

No obstante, debido a las evidencias sobre las funciones de almacenamiento y regulación de caudales de agua de los bofedales en los Altos Andes Centrales, son necesarias acciones inmediatas, de carácter urgente, a favor de la conservación y la restauración de los humedales, la remediación de pasivos ambientales, y toda detención de procesos degradativos en las cuencas con el fin de optimizar los procesos hídricos e hidrogeológicos que abastecen y regulan el agua para la metrópolis de Lima y los valles de cultivo de la cuenca del Rímac.

Las acciones inmediatas demandan un inventario que incluya un relevamiento de situaciones críticas, su mapeo y una evaluación rápida cualitativa o semicuantitativa de las intensidades y dimensiones de los impactos, así como también de los riesgos asociados, en el corto plazo, de continuar estos procesos activos. Este instrumento de diagnóstico de la situación actual y de futuro cercano permitirá priorizar las acciones de manejo para restaurar, remediar y prevenir efectos negativos sobre el abastecimiento de agua y la regulación de caudales aguas abajo en esta vital cuenca de alimentación de agua para Lima.



Corte de champa en Yantac perteneciente a la cuenca de Rímac. Jorge Gonnet.

Conclusiones

El abastecimiento y regulación de los flujos de agua para la ciudad de Lima y los valles están en situación crítica, y la proyección futura pronostica una intensificación de esta problemática. La infraestructura gris por sí sola no alcanzará a paliar el déficit hídrico si no se toman acciones que tiendan a conservar los ambientes claves que intervienen en los procesos hidrológicos e hidrogeológicos, con una fuerte influencia en el servicio de provisión de agua a Lima y los valles, como lo son los bofedales y lagunas en las zonas altas de recarga.

Los humedales altoandinos (bofedales y lagunas) regulan los caudales en las nacientes de las cuencas al tener la capacidad de almacenar y retener agua durante la recarga en las estaciones de lluvias y erogarla gradualmente durante los períodos de sequía y estiaje. Los bofedales, además, mejoran la calidad química del agua, controlan sedimentos y recargan los acuíferos subterráneos.

Estas funciones ecosistémicas de los humedales ubicados en cabeceras de cuencas estratégicas representan para la sociedad, servicios ecosistémicos hídricos cuya optimización contribuirá a un mejor rendimiento del agua hacia los valles del Rímac y hacia la ciudad de Lima.

Se concluye la necesidad urgente de incrementar las escalas de aplicación de políticas y acciones de conservación (ver RECOMENDACIONES), prevención de impactos y restauración o regeneración de estos ambientes claves de los Andes Centrales, de los que dependen las poblaciones locales hasta las zonas más bajas tanto de la vertiente pacífica como de la atlántica.

Bibliografía

- Acosta Sullcahuaman, L., B. De Believre, y K. Pérez. (2018). Guía para el diagnóstico hídrico base aplicado a las empresas prestadoras de servicios de saneamiento en el Perú. Obtenido de la serie de apoyo al diseño de implementación de mecanismos de retribución por servicios ecosistémicos (MRSE): file:///C:/Users/toshiba/Downloads/1465372644_6_diagnostico_rapido1.pdf
- Adauto, E. y L. Willems. (2016). Estudio de la evolución del ecosistema de bofedales de la cabecera de las cuencas Pisco y Pampas (Huancavelica) empleando imágenes TM y OLI. Lima: Repositorio digital del Ministerio del Ambiente del Peru.
- ANA. (2012). Informe Técnico. Resultado del monitoreo de la calidad del agua en la cuenca del río Rímac. Informe técnico N° 006-2012 ANA-DGCRH/JJOS. Dirección de la Calidad de los Recursos Hídricos, Autoridad Nacional del Agua. Lima, Perú.
- ANA. (2014). Estudio cualitativo y orientaciones estratégicas: hacia el diagnóstico sobre el estado situacional de la cultura del agua en 5 cuencas de la vertiente del Atlántico, en los departamentos de Cajamarca y Amazonas. Autoridad Nacional del Agua. Lima, Perú. Recuperado el 23 de junio de 2020. <http://www.ana.gob.pe/media/928702/informe%20final%20estudio%20cultura%20del%20agua.pdf>
- Andina. (05 de Mayo de 2011). Represas que surten de agua a Lima y Callao se encuentran llenas al 100%. *Andina Agencia Peruana de Noticias*. Recuperado el 16 de Mayo de 2020. <https://andina.pe/agencia/noticia-represas-surten-agua-a-lima-y-callao-se-encuentran-llenas-al-100-357065.aspx>
- Armijo León, A. (2015). Caracterización de cuerpos de agua asociados a vegas altoandinas de la hoya hidrológica del río Elqui, del desierto transicional de Chile. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería de Procesos, Universidad de las Palmas de Gran Canaria. Santiago de Chile, Chile.
- Bernex, N. (2019). Cuenca sostenible para una ciudad sostenible: La sub-cuenca de Santa Eulalia y Lima Metropolitana. Seminario internacional Ciudades sostenibles y cambio climático: desafíos y experiencias. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú. Burt, T.P. (1995). The role of wetlands in runoff generation from headwater catchments. En J. M. R. Hughes y A. L. Heathwaite (Eds.), *Hydrology and hydrochemistry of British wetlands* (pp. 21–38). Chichester: Wiley.
- Buytaert W., R. Célleri, B. De Bièvre, F. Cisneros, G. Wyseure, J. Deckers, y R. Hofstede. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews* 79(1–2): 53–72. DOI: 10.1016/j.earscirev.2006.06.002
- Castro Méndez, C.E., D.M. Guzmán Lugo, y D.L. Cortés Delgadillo. (2021). El almacenamiento y la disponibilidad de agua en la determinación del uso potencial de las tierras. *Revista GEOESPACIAL* (enero-junio 2021) 18(1): 36-48.
- Célleri, R., W. Buytaert, B. De Bièvre, C. Tobón, P. Crespo, J. Molina, y J. Feyen. (2010). Understanding the hydrology of tropical Andean ecosystems through an Andean network of basins. *Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins* (Proceedings of the Workshop held at Goslar-Hahnenklee, Germany, 30 March–2 April 2009). IAHS Publ. 336, 2010: 209-212.
- Cooper, D.J., E.C. Wolf, C. Colson, W. Vering, A. Granda, y M. Meyer. (2010). Alpine peatlands of the Andes, Cajamarca, Peru. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 42: 19-33.
- Gammie, G. y B. De Bievre. (2019). Evaluando intervenciones verdes para abastecer de agua a Lima, Perú Costo-efectividad, impacto potencial y áreas prioritarias de investigación. Lima: CONDESAN.
- García Chávez, K. (2019). Diagnóstico hídrico rápido de la microcuenca auqui como fuente de aprovisionamiento de agua a favor de la EPS Chavín Huaraz – Ancash. Huaraz: Universidad Nacional Santiago Antunez de Mayolo.
- Gestión, D. (2020). Desabastecimiento de agua potable, un problema adicional en medio de la crisis por el coronavirus. Lima.

- Giraldo Araujo, E. (2016). Estado de salud de los bofedales de las cabeceras de las microcuencas de San Luis y San Nicolás. Proyecto "Asegurando el Agua y los Medios de Vida en la Montaña". USAID – Instituto de Montaña.
- Gómez Portal, S. (2016). Hidrogeología en bofedales alto andinos con fines de aprovechamiento hídrico en la comunidad Rosaspata Vinchos - Ayacucho 2015. Ayacucho: Universidad Nacional San Cristobal de Huamanga.
- Gonnet, J.M., C. López Vegazo, D.A. Esteban, y E. Lictévout. (2016). Introducción al manejo de vegas y bofedales mediante prácticas tradicionales de culturas andinas en el norte de Chile. Corporación de Estudios y Desarrollo Norte Grande (Ed.). 43 pp.
- GWP. (2014). Towards a water secure world - South America. Recuperado el 15 de Abril de 2020, de Global Water Partnership: <https://www.gwp.org/es/GWP-Sud-America/EN-ACCION/programas/PACyD-Sudamerica1/subcuenca-santa-eulalia/>
- Heathwaite, A. L.(1995). Overview of the hydrology of British wetlands. In Hydrology and hydrochemistry of British wetlands (J.M. R. Hughes y A. L. Heathwaite Eds.), pp. 11–20. Chichester: Wiley.
- Holden, J. (2005) Peatland hydrology and carbon release: why small-scale process matters. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 363 (1837): 2891-2913.
- INAIGEM. (2018). Inventario Nacional de Glaciares. Huaraz-Perú: Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña.
- INEI. (2018). Proyección Población de Lima Metropolitana. Lima: Instituto Nacional de Estadística e Informática.
- Jiménez García, Y. (2018). Estudio de la influencia de los componentes del balance hídrico de un pajonal altoandino en la dinámica del agua edáfica de un bofedal, en la quebrada Llaca - parque nacional Huascarán 2016-2017. Huaraz: Universidad Nacional Santiago Antunez de Mayolo.
- Johnston, C. (1991). Sediment and Nutrient Retention by Freshwater wetlands: Effects on Surface Water Quality. *Critical Reviews in Environmental Control*, 21 (5,6): 491-565.
- Joosten, H., y D. Clarke (2002). Wise use of mires and peatlands. *International Mire Conservation Group and International Peat Society*, 304.
- Maldonado Fonken, M. (2014). Introducción a los bofedales de la región Altoandina Peruana. *Mires and Peat*, 15(5): 1–13. <http://www.mires-and-peat.net/>. International Mire Conservation Group and International Peat Society.
- Miramira, B., L. Vilcapoma, y J. Jacay. (2016). Caracterización mineralógica y elemental de sedimentos sólidos de la laguna de Yantac, departamento de Junín, provincia de Yauli, distrito de Marcapomacocha, por difracción y fluorescencia de rayos X. *Revista Del Instituto De investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias geográficas*, 19(38): 91–96. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v19i38.13573>
- Morales M.S., D. Christie, R. Neukom, F. Rojas, y R. Villalba. (2018) Variabilidad hidroclimática en el Sur del Altiplano: Pasado, presente y futuro. Volumen especial en Grau HR, Babot MJ, Izquierdo AE, Grau A. (Editores) *La Puna Argentina: Naturaleza y Sociedad. Serie Conservación de la Naturaleza. Fundación Miguel Lillo*.
- Neukom, R., M. Rohrer, P. Calanca, N. Salzmann, C. Huggel, D. Acuña, D.A. Christie, y M.S. Morales. (2015). Facing unprecedented drying of the Central Andes? Precipitation variability over the period AD 1000–2100. *Environmental Research Letters* 10: 084017.
- Observatorio del agua. (2019). Modelo WEAP para las cuencas Chillón, Rímac, Lurín, Chilca y Alto Mantaro. Lima.
- Ochoa-Tocachi, B., W. Buytaert, B. De Bièvre, R. Céleri, P. Crespo, M. Villacís, C. Llerena, L. Acosta, M. Villazón, M. Guallpa, J. Gil-Ríos, P. Fuentes, R. Olaya, P. Viñas, G. Rojas, y S. Arias. (2016). Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments. *Hydrological Processes*, 30: 4074– 4089.

- Ogawa, H. y J.W. Male. (1986). Simulating the flood mitigation role of wetlands. *J. Water Resour. Plan. Manage.* 112: 114–128.
- Pérez-Olmedilla, M., S. Sanchez-Carrillo y C. Rojo (2000). Función depuradora de los humedales II: Una revisión bibliográfica sobre el papel del sedimento. *Humedales Mediterráneos*, 1: 123-130.
- Ramsar. (2015). 9ª Reunión de la Conferencia de las Partes Contratantes en la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971). Irán.
- SEDAPAL. (2014). Plan Maestro de los sistemas de agua potable y alcantarillado (Tomo I). Lima: SEDAPAL.
- SEDAPAL. (2017). Proyecto: Obra complementaria del interceptor norte construcción de cámara de descarga para el rebose de emergencia - Distrito de Callao. Lima.
- Schoolmeester, T., M. Saravia, M. Andresen, J. Postigo, A. Valverde, M. Jurek, B. Alfthan, y S. Giada. (2016). Outlook on Climate Change Adaptation in the Tropical Andes mountains. Mountain Adaptation Outlook Series. United Nations Environment Programme. Nairobi, Arendal, Vienna and Lima: GRID Arendal and CONDESAN.
- Solano Castillo, W. (2015). Túnel Trasandino – Marcapomacocha I Marcapomacocha III. Informe Temático N° 155/2014-2015. Compilación de estudios prospectivos sobre el servicio de agua potable en Lima-Perú. Lima: Congreso de la República del Perú.
- Soliz, H. (2011). Componente hidrológico del bofedal del nevado Illimani. Proyecto Illimani: Fortaleciendo la capacidad y desarrollando estrategias de adaptación a los fenómenos de cambio climático en comunidades de la Cordillera Real de los Andes Centrales. La Paz. 37 p.
- SUNASS. (2018). SUNASS presidió asamblea del Foro Peruano para el Agua – GWP Perú. Recuperado el 05 de Junio de 2020, de Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento: <https://www.sunass.gob.pe/websunass/index.php/noticias/noticias-lima/item/1633-sunass-presidio-asamblea-del-foro-peruano-para-el-agua-gwp-peru>
- Valois, R., N. Schaffer, R. Figueroa, A. Maldonado, E. Yáñez, A. Hevia, G. Yáñez Carrizo, y S. MacDonell. (2020). Characterizing the Water Storage Capacity and Hydrological Role of Mountain Peatlands in the Arid Andes of North-Central Chile. *Water* 12, 1071; doi:10.3390/w12041071
- Woo, M.-K. y K. Young. (1998). Characteristics of patchy wetlands in a polar desert environment, Arctic Canada. *Proc. 7th Int. Conf. on Permafrost*, 23–27 June, Yellowknife, pp. 1141–1146.



Fundación Humedales / Wetlands International

Cap. Gral. Ramón Freire 1512
(1426) Buenos Aires, Argentina
Tel/Fax: +54 (11) 4552 2200
info@humedales.org.ar
<http://lac.wetlands.org>



**Asociación ecosistemas Andinos
ECOAN**

Psje Navidad, U-10, dpto 302, urb
Ttio, Wanchaq, Cusco, Perú.
Tel: +51(84)227988
info@ecoanperu.org
<http://www.ecoanperu.org>

ISBN 978-987-47431-9-0

