

# CUBHIC 2.0: PRESENTACIÓN DE METODOLOGÍA



## Infraestructura Natural

para la Seguridad Hídrica





---

**Autoría:**

Boris F. Ochoa-Tocachi<sup>1,2</sup>  
José Cuadros-Adriazola<sup>3</sup>  
Vivien Bonnesoeur<sup>3</sup>  
Francisco Román-Dañobeytia<sup>3</sup>  
Gena Gammie<sup>1</sup>

---

**Producción y cuidado de edición:** Gabriel Rojas Guillén<sup>1</sup>**Corrección de estilo:** Luis Rodríguez Pastor**Diseño y diagramación:** Diana La Rosa**Imagen de portada:** Renny Daniel Díaz Aguilar. Concurso "Naturaleza que Cuida"

---

**Editado por:** Forest Trends Association

RUC: 20606691204

Av. Ricardo Palma 698, Miraflores

Lima, Peru

**Impresión:**

Negrapata S.A.C.

Jr. Suecia 1470, Urb. San Rafael, Lima

Primera edición, agosto de 2022

Tiraje: 300 ejemplares

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú n.º 2022-08023

Impreso en Perú, agosto de 2022

---

**Afiliaciones:**

1. Forest Trends; Washington D. C., Estados Unidos
2. ATUK Consultoría Estratégica; Cuenca, Ecuador
3. CONDESAN; Lima, Perú

---

*Esta publicación es posible gracias al generoso apoyo del pueblo de los Estados Unidos de América a través de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y el Gobierno de Canadá. Los contenidos son responsabilidad de los autores y no reflejan necesariamente las opiniones de USAID, ni del gobierno de los Estados Unidos de América ni del Gobierno de Canadá.*

# Acerca de CUBHIC 2.0

La cuantificación de beneficios hidrológicos es clave para el diseño y evaluación de proyectos de infraestructura natural para la seguridad hídrica. La metodología CUBHIC (Cuantificación de Beneficios Hidrológicos de Intervenciones en Cuencas) es una innovación del proyecto Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica, que **ofrece una metodología práctica para producir estimaciones cuantitativas de los beneficios hidrológicos de proyectos de infraestructura natural**. Si bien existen métodos de modelación hidrológica más complejos para simular los procesos hidrológicos y el transporte de sedimentos, por lo general estos requieren muchas más mediciones de campo, una calibración intensiva del modelo y una

extensa experiencia del equipo modelador. CUBHIC ofrece una versión simplificada –pero robusta– de modelación para el uso de un público interesado amplio.

La versión original de CUBHIC fue desarrollada en colaboración con la firma Kieser & Associates y publicada en 2019<sup>1</sup>, considerando las seis intervenciones sobre la infraestructura natural más comunes en el contexto peruano.

La versión 2.0 de CUBHIC construye sobre el original, presentando varias actualizaciones, cambios y mejoras que hemos encontrado útil en su aplicación práctica (**Tabla I**).

**Tabla I.** Cambios implementados en CUBHIC 2.0 con respecto a la versión 1.0.

<b>Mejoras en los cálculos</b>	CUBHIC 2.0 realiza la modelación del ciclo hidrológico completo hasta la generación de caudal total, incluyendo escorrentía superficial, interfluo (o flujo subsuperficial) y flujo base subterráneo.
	Se han revisado, actualizado y mejorado las fórmulas de cálculo de los procesos hidrológicos y erosivos.
	Se ha unificado la metodología CUBHIC, de manera que ahora todas las intervenciones analizadas siguen el mismo flujo de cálculo y consideran todos los procesos hidrológicos e indicadores.
<b>Mejoras en las calculadoras</b>	Se ha reorganizado la definición de valores de entrada.
	Se ha reformulado la definición de escenarios de evaluación.
	Se ha agregado un conjunto más amplio y completo de indicadores para cuantificar los servicios hidrológicos prioritarios, incluyendo indicadores de regulación hídrica, rendimiento hídrico, control de erosión y análisis de umbrales para evaluar el control de eventos extremos altos y bajos de caudal y carga de sedimentos.
	Se ha implementado un módulo de evaluación de desempeño para la calibración y validación del escenario de línea base usando datos de caudal observados.
	Se ha desarrollado una calculadora de beneficios CUBHIC 2.0 Integral, que combina todas las intervenciones evaluadas (también llamada SUPERCUBHIC 2.0).
<b>Mejoras en la presentación</b>	El paquete metodológico CUBHIC 2.0 ha sido expandido para incluir un manual de uso, videos tutoriales y casos de aplicación.
	Se ha mejorado la interfaz de uso de las calculadoras de beneficios para facilitar su utilización y para hacer más intuitiva y atractiva su aplicación e interpretación de resultados.

Fuente: Elaboración propia.

<sup>1</sup> Foster, M. E., Chen, D., Kieser, M. S., & McLaughlin, D. B. (2019). CUBHIC: Metodologías de cuantificación de beneficios hidrológicos de intervenciones en cuencas. Forest Trends, Lima, Perú.



Foto: Zarela Estabridis

## ¿Qué contiene el paquete de CUBHIC 2.0?

El paquete completo de la metodología CUBHIC 2.0 incluye: (i) presentación y resumen de la metodología (este documento), (ii) los documentos metodológicos para cada intervención sobre la infraestructura natural, (iii) las calculadoras de beneficios de cada una, (iv) un manual de uso para el uso de las calculadoras y (v) videos tutoriales. La familia de herramientas CUBHIC se encuentra disponible en: <https://www.forest-trends.org/publications/cubhic-2-0/>

Los documentos metodológicos muestran las ecuaciones utilizadas en la metodología CUBHIC 2.0, las cuales buscan ofrecer un resultado confiable y minimizar la cantidad de datos de entrada requeridos. Cada intervención sobre la infraestructura natural evaluada cuenta con su propio documento metodológico.

La metodología CUBHIC 2.0 ha sido implementada en seis calculadoras de beneficios compatibles con Microsoft Excel y similares<sup>2</sup>. Cada calculadora de CUBHIC 2.0 permite la estimación de beneficios hídricos de intervenciones sobre la infraestructura natural en el sitio de un proyecto y a escala de

cuenca, ofreciendo una opción práctica para la cuantificación de impactos sobre los servicios ecosistémicos prioritarios. Las calculadoras incluyen parámetros predeterminados que se pueden calibrar o modificar utilizando información de monitoreo en el sitio del proyecto. De manera recíproca, la aplicación de la metodología CUBHIC 2.0 también permite informar cuáles podrían ser los datos más críticos para diseñar sistemas de monitoreo relevantes en el sitio del proyecto. Se ha desarrollado una calculadora de beneficios SUPERCUBHIC 2.0 Integral que combina las seis intervenciones evaluadas en una sola aplicación.

El manual de uso<sup>3</sup> y los videos tutoriales complementan la metodología y hacen uso de las calculadoras de beneficios de manera didáctica para el público. Estos productos presentan el uso de la interfaz de las calculadoras de beneficios, definición de escenarios, cálculo de resultados hidrológicos, cálculo de resultados económicos, unos ejemplos de aplicación y una guía para la calibración del escenario de línea base.

<sup>2</sup> Ochoa-Tocachi, B. F., Cuadros-Adriazola, J., & Bonnesoeur, V. (2022a). CUBHIC 2.0: Calculadoras de Beneficios. Forest Trends, Lima, Perú.

<sup>3</sup> Ochoa-Tocachi, B. F. & Cuadros-Adriazola, J., & Bonnesoeur, V. (2022b). CUBHIC 2.0: Manual de Uso. Forest Trends, Lima, Perú.

# La metodología CUBHIC 2.0

La metodología CUBHIC 2.0 corresponde a la de un modelo de simulación conceptual basado en principios físicos; es determinístico, procesa y genera datos a escala temporal diaria y de manera continua, y a escala espacial agregada.

## Conceptual basado en principios físicos

La metodología CUBHIC 2.0 toma en cuenta conceptualizaciones basadas en el conocimiento sobre los procesos hidrológicos dominantes a través de parámetros procesados matemáticamente. Estos parámetros representan características de la cobertura de vegetación, del suelo, del sitio de estudio y de las intervenciones sobre la infraestructura natural analizadas. Si bien varios de estos parámetros se pueden medir en campo y están relacionados a procesos físicos, las ecuaciones y relaciones utilizadas son conceptuales (por ejemplo, el método de número de curva o la ecuación de pérdida de suelo). Otros procesos están basados en la física, como el balance hídrico, el cálculo de la evapotranspiración o el funcionamiento de las intervenciones.

## Determinístico

Para un conjunto de parámetros específico y bajo las mismas condiciones iniciales y datos de entrada, la metodología CUBHIC 2.0 genera siempre los mismos resultados. Esto permite que la manipulación de los valores de entrada de los parámetros durante un proceso de calibración permita representar el funcionamiento de la cuenca o sitio modelado y que modificaciones en dichos parámetros permitan obtener las mejores simulaciones de caudal y concentración de sedimentos posible.

## Escala temporal

La escala temporal de la metodología CUBHIC 2.0 son series de datos diarios. Las entradas necesarias para el cálculo de balance hídrico son precipitación

diaria, temperaturas mínima y máxima diarias, y evapotranspiración potencial diaria. Para objeto de calibración, se debe ingresar una serie de tiempo de caudal diario en el punto de aforo en cuestión. Desde un punto de vista netamente técnico, la metodología CUBHIC 2.0 funcionaría también a otras escalas temporales, pero ha sido implementada de esta manera en las calculadoras.

## Continuo

La metodología CUBHIC 2.0 procesa series de tiempo de datos de precipitación, temperatura, evapotranspiración y caudal observado de manera continua. Esto permite, asimismo, obtener resultados en forma de series de tiempo continuas de estados de reservorios hidrológicos, escorrentía, caudales, carga y concentración de sedimentos.

## Escala espacial

La unidad de análisis espacial de la metodología CUBHIC 2.0 es la cuenca hidrográfica, aunque también se puede considerar que el análisis se enfoca en intervenciones a nivel de proyecto (escala menor). En ambos casos, esto se conoce como el área de estudio.

## Agregado

La metodología CUBHIC 2.0 procesa los datos ingresados en forma de promedios representativos del área de estudio; por ejemplo, profundidad de suelo, ubicación geográfica, altitud, pendiente, características de suelo, entre otras. Las variables climáticas utilizadas son representativas para el área de estudio, así como lo son las salidas de caudales y sedimentos obtenidas. Durante la definición de escenarios se pueden ingresar datos desagregados de hasta tres tipos de cobertura de vegetación, los cuales son promediados de manera ponderada para obtener valores representativos agregados para cada escenario.

## Enfoque de la metodología

La metodología CUBHIC 2.0 utiliza una base conceptual común que está detrás de todas las aplicaciones en el análisis de intervenciones sobre la infraestructura natural. Esta base conceptual incluye una ecuación de balance hídrico en el suelo, cálculo de evapotranspiración, enrutamiento de caudal y una ecuación de pérdida de suelo. Asimismo, la metodología realiza un cálculo de pérdida de suelo y carga de sedimentos. Finalmente, la metodología calcula resultados e indicadores hidrológicos y económicos para la comparación entre escenarios.

Esta metodología es aplicada para seis tipos de intervenciones sobre la infraestructura natural:

- 1. Protección de bosques y restauración forestal.**
- 2. Conservación y restauración de pastizales altoandinos.**
- 3. Implementación de zanjas de infiltración.**
- 4. Construcción y recuperación de amunas (canales ancestrales de infiltración).**
- 5. Construcción de Qochas (microreservorios permeables).**
- 6. Conservación y restauración de humedales altoandinos.**
- 7. SUPERCUBHIC 2.0 Integral. Combinación de diferentes intervenciones.**

Los pasos generalizados que se emplean para realizar la cuantificación del balance hídrico y erosión del suelo usando la metodología CUBHIC 2.0 son los siguientes:

### I. Recopilación de datos de entrada:

- a.** Datos de entrada específicos del sitio de estudio:
  - i. Cobertura de vegetación.
  - ii. Características de las intervenciones sobre la infraestructura natural.
  - iii. Propiedades del sitio de estudio.
  - iv. Criterios de evaluación del caso de estudio.
- b.** Datos de entrada específicos en el intervalo de tiempo:
  - i. Datos de temperatura máxima.
  - ii. Datos de temperatura mínima.
  - iii. Datos de precipitación.
  - iv. Datos de evapotranspiración (en caso de que se cuenten con mediciones).
  - v. Datos de caudal (para la calibración de la línea base).
  - vi. Datos adicionales (para ciertas intervenciones específicas, como ingreso de caudal trasvasado, drenaje de humedales o caudal aguas abajo).

### 2. Cálculos de cuantificación para el intervalo de tiempo definido:

- a.** Evapotranspiración real simulada.
- b.** Escorrentía simulada.
- c.** Percolación simulada.
- d.** Caudal total simulado.
- e.** Caudal base simulado.
- f.** Generación de sedimentos simulada.
- g.** Concentración de sedimentos simulada.

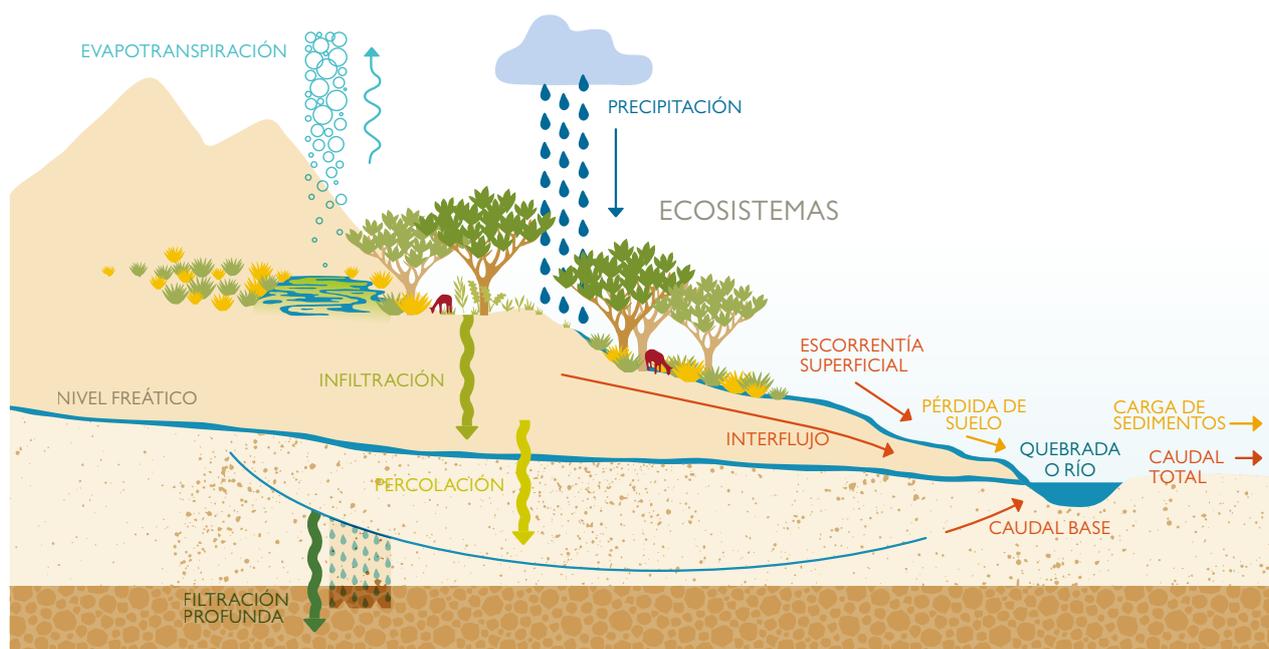
### 3. Análisis de beneficios:

- a. Salidas de variables hidrológicas y de erosión de los escenarios.
- b. Análisis de umbrales para eventos extremos.
- c. Diferencias calculadas con respecto a la línea base.
- d. Costo-eficiencia de los escenarios.

Los pasos de cálculo propuestos para cuantificar los impactos de las intervenciones sobre la infraestructura natural se enfocan en dos conjuntos de ecuaciones primarias: una ecuación de balance hídrico y una ecuación de pérdida de suelo.

## Ecuación de balance hídrico

**Figura 1.** Procesos hidrológicos considerados en el cálculo del balance hídrico en CUBHIC 2.0.



Fuente: Elaboración propia.

En CUBHIC 2.0, la precipitación que cae en un área determinada puede convertirse en escorrentía, retornar a la atmósfera a través de evapotranspiración, infiltrarse en el suelo para llenar los espacios en los poros, transformarse en interflujo o percolarse como agua subterránea (**Figura 1**). El agua que se percola en la superficie freática local puede fluir

lateralmente como caudal base y alimentar el caudal total del curso de agua en evaluación o recargar las aguas subterráneas de acuíferos profundos. Estos procesos son modificados debido al efecto de las intervenciones sobre la infraestructura natural que son implementadas.



Foto: Armando Molina

## Ecuación de pérdida de suelo

La pérdida de suelos asociada con la escorrentía terrestre a menudo se calcula a partir de ecuaciones de estimación desarrollados originalmente en los Estados Unidos durante las últimas décadas. Desde entonces se han utilizado en otras aplicaciones internacionales. Estas ecuaciones se basan en la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE, por sus siglas en inglés) o una variación de esta, como MUSLE, MUST, o USLE-M. Estas variaciones se han desarrollado para mejorar la precisión de la ecuación USLE debido a su tendencia a sobreestimar la pérdida de suelo para pequeños eventos de precipitación y subestimar la pérdida de suelo para grandes eventos de precipitación<sup>4</sup>. Estas variaciones de la ecuación USLE introducen un componente a la ecuación que toma en cuenta la escorrentía.

La ecuación USLE-M requiere solo entradas estándar de la ecuación USLE, así como los volúmenes de escorrentía y precipitación ya necesarios para la ecuación de balance hídrico propuesta en la metodología CUBHIC 2.0. Se ha tomado inspiración de algunos de los cálculos relevantes del modelo hidrológico SWAT (p.ej., factores  $L \cdot S$  y evapotranspiración) en este documento<sup>5</sup>.

## Definición de escenarios

Para poder cuantificar los impactos de las intervenciones sobre la infraestructura natural, se ejecutan las ecuaciones de balance hídrico y de pérdida de suelo para una línea base y para escenarios de intervención. La línea base representa el antes (o escenario actual), mientras que los escenarios de intervención representan el después de la implementación.

En CUBHIC 2.0, los escenarios se definen como combinaciones de las coberturas de vegetación y uso de suelo ingresados en los datos de entrada. Cada tipo de cobertura tiene sus propios valores de número de curva (CN), índice de área foliar (LAI), factor C de USLE, albedo ( $\alpha$ ) y coeficiente de evapotranspiración ( $K_e$ ). Esto permite mayor flexibilidad en la definición de escenarios que no necesariamente pueden ser caracterizados por una cobertura uniforme. Además, las calculadoras CUBHIC 2.0 facilitan el cálculo automático de las variables combinadas para cada escenario basado en un promedio ponderado.

Los escenarios también involucran intervenciones sobre la infraestructura natural particulares, las cuales son abordadas a detalle más adelante.

<sup>4</sup> Kinnell, P. I. A. (1998). Converting USLE soil erodibilities for use with the QREI30 Index. *Soil and Tillage Research* 45: 349-357.

<sup>5</sup> Texas A&M University (2019). Soil & Water Assessment Tool (SWAT). Disponible en: <https://swat.tamu.edu/software/>.

## Cálculo de beneficios

En CUBHIC 2.0, cada escenario genera resultados de balance hídrico, caudal y erosión de suelo, los cuales son comparados entre ellos. Debido a que la metodología representa procesos hidrológicos completos, se pueden calcular las siguientes salidas, beneficios y pérdidas hidrológicas sobre la cantidad y calidad del agua, y sobre la regulación de riesgos naturales (**Tabla 2**).

El sentido del beneficio hídrico indica cuando se considera un beneficio hídrico. El signo más (+) representa que cuando el valor de la variable aumenta, entonces se considera un beneficio positivo. Por ejemplo, cuando aumenta el caudal mínimo o la magnitud de caudal bajo, o cuando aumenta el índice de caudal base o aumenta el número de días en el que la carga de sedimentos se encuentra por debajo del umbral. En contraste, el signo menos (-) representa que cuando el valor de la variable disminuye.

**Tabla 2.** Definición de salidas hidrológicas para la evaluación de beneficios de las intervenciones en cuencas con CUBHIC 2.0.

Servicio ecosistémico hídrico	Variable	Unidad	Sentido del beneficio hídrico
Regulación hidrológica	Escorrentía superficial.	$\times 1000 \text{ m}^3$	-
	Percolación.	$\times 1000 \text{ m}^3$	+
	Caudal base.	$\times 1000 \text{ m}^3$	+
	Índice de estacionalidad de lluvia.	%	-
	Porcentaje de días con lluvia cero.	%	-
	Índice de caudal base.	%	+
	Coefficiente de rendimiento de caudal base.	%	+
	Pendiente de la curva de duración de caudal.	mm/mm	-
	Índice de rapidez de respuesta Richards-Baker.	mm/mm	-
	Índice de estacionalidad de caudal.	%	-
	Porcentaje de días con caudal cero.	%	-
	Rango de caudal $Q_{\text{máx}} / Q_{\text{mín}}$ .	%	-
	Coefficiente de variación de caudal.	mm/mm	-
Rendimiento hídrico	Evapotranspiración real.	$\times 1000 \text{ m}^3$	-
	Caudal total.	$\times 1000 \text{ m}^3$	+
	Coefficiente de escorrentía superficial.	%	+
	Coefficiente de rendimiento de caudal base.	%	+
	Índice de humedad.	%	+
Calidad física del agua	Carga de sedimentos.	ton	-
	Concentración de sedimentos.	$\text{g}/\text{m}^3$	-
Regulación de eventos extremos de caudal	Número de días por encima de umbral alto de caudal.	día	-
	Caudal por encima del umbral alto.	$\times 1000 \text{ m}^3$	-
	Caudal máximo.	$\times 1000 \text{ m}^3$	-
	Número de días por debajo de umbral bajo de caudal.	día	-
	Caudal por debajo del umbral bajo.	$\times 1000 \text{ m}^3$	+
	Caudal mínimo.	$\times 1000 \text{ m}^3$	+
Regulación de eventos extremos de sedimentos	Número de días por encima de umbral alto de sedimentos.	día	-
	Carga de sedimentos por encima del umbral alto.	ton	-
	Carga de sedimentos máxima.	ton	-
	Número de días por debajo de umbral bajo de sedimentos.	día	+
	Carga de sedimentos por debajo de umbral bajo.	ton	-
	Carga de sedimentos mínima.	ton	-

Las salidas se expresan en unidades de:  $\times 1000 \text{ m}^3$ : mil metros cúbicos de agua; ton: toneladas de sedimento;  $\text{g}/\text{m}^3$ : gramos de sedimento por metro cúbico de agua; día: número de días por encima o por debajo de umbral; %: porcentaje; mm/mm: milímetros sobre milímetros o relación adimensional entre unidades similares de caudal.

Fuente: Elaboración propia.

En CUBHIC 2.0 se consideran costos de implementación (USD/ha) por cobertura de suelo individual, costos por intervención sobre la infraestructura natural y otros costos adicionales que pueden ser definidos manualmente. El costo del escenario (USD/ha) se estima mediante una comparación con el escenario base para determinar el costo diferencial de implementación (USD). Utilizando el costo total de implementación, se dividen los beneficios hidrológicos estimados y se obtiene la costo-eficiencia (USD/variable analizada) para cada uno.

## Intervenciones analizadas

# I. Protección de bosques y restauración forestal

La protección de bosques hace referencia a la práctica de evitar la degradación o la deforestación de los bosques, y, así, conservar los servicios ecosistémicos hídricos brindados por los bosques. La restauración forestal, por otro lado, incluye intervenciones como la forestación, la reforestación, la silvopastura y la agroforestería. Se define como forestación al establecimiento de cobertura forestal mediante la regeneración natural o en forma de plantaciones en zonas que en el pasado tuvieron o no bosques<sup>6</sup>. La restauración forestal creará una serie de impactos en toda el área que se extiende hasta el nivel de cuenca. Para que esta intervención logre beneficios generales de calidad y cantidad de agua, dependerá en gran medida de cómo los diseños de restauración forestal respondan a factores hidrológicos y físicos

que influyen en la escorrentía y, a su vez, en la erosión del suelo.

La cuantificación de beneficios de la protección de bosques y la restauración forestal requiere contabilizar las interacciones entre evapotranspiración, percolación, contenido de humedad y pérdida de suelo. Se espera que la restauración forestal dé lugar tanto a un incremento en la evapotranspiración en el área reforestada como a una reducción en la escorrentía superficial de agua. Se espera que una menor escorrentía reduzca la pérdida de suelo, beneficiando con ello la calidad física del agua, aguas abajo, a través de la reducción de pérdida de suelo y aportes de nutrientes a los cuerpos de agua. Sin embargo, el aumento en evapotranspiración producirá una disminución en el rendimiento hídrico total de la cuenca y, posiblemente, también en el caudal base (Figura 2).

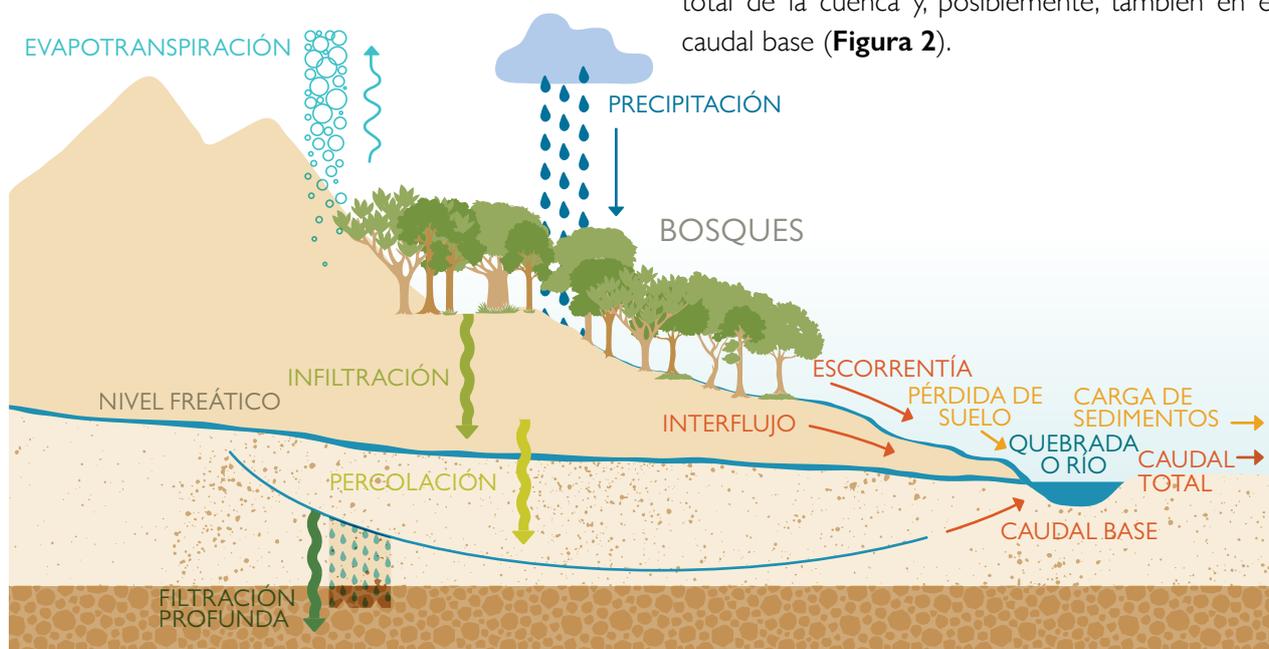


Fig. 2 Entradas y salidas de balance hídrico para la protección de bosques y restauración forestal. Fuente: Modificado de Foster et al., 2019.

<sup>6</sup> Bonnesoeur, V., Locatelli, B., Guariguata, M. R., Ochoa-Tocachi, B. F., Vanacker, V., Mao, Z., Stokes, A., & Mathez-Stiefel, S.-L. (2019). *Impacts of Forests and Forestation on Hydrological Services in the Andes: A Systematic Review*. *Forest Ecology and Management*, 433: 569-584.



## 2. Conservación y restauración de pastizales altoandinos

Los pastizales altoandinos son ecosistemas que se forman en la Cordillera de los Andes a gran altitud, arriba del límite de los bosques montanos, pero por debajo de la línea de nieve permanente<sup>7</sup>. En esta ecorregión, la vegetación predominante es el pasto y los arbustos. La precipitación anual en los pastizales altoandinos varía, dependiendo de la elevación y la ubicación; algunos pastizales se caracterizan por condiciones húmedas, mientras que otros son relativamente secos<sup>8</sup>.

Los beneficios hidrológicos de la restauración y protección de los pastizales altoandinos dependen

mucho del diseño de esta intervención y de cómo los factores físicos e hidrológicos influyen la evapotranspiración, la percolación y, al final, el caudal base, que se deben tomar en cuenta en estas interacciones hidrometeorológicas. La restauración y protección de los pastizales altoandinos puede aumentar la percolación profunda de la precipitación, que resultaría en un incremento del caudal base en temporada de estiaje. Sin embargo, los pastizales pueden también llegar a generar una mayor evapotranspiración en la zona restaurada en función de su densidad, en comparación con zonas con menor vegetación (**Figura 3**).

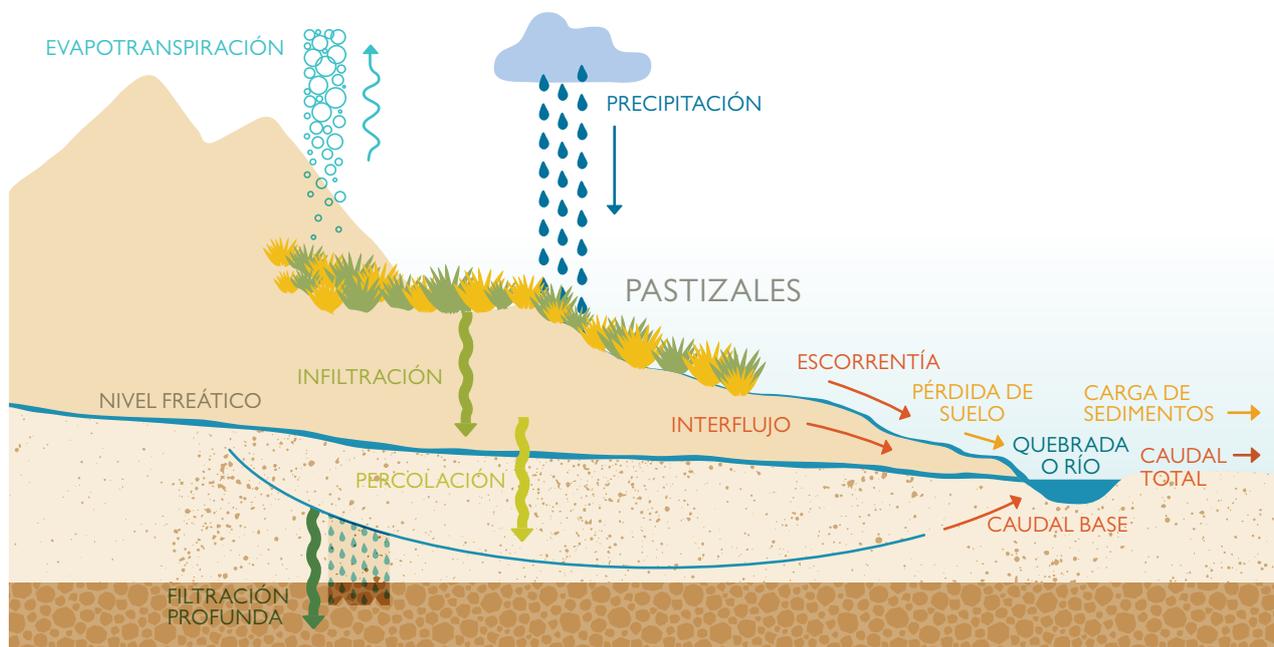


Fig. 3 Entradas y salidas de balance hídrico para la conservación y restauración de pastizales altoandinos. Fuente: Modificado de Foster et al., 2019.

<sup>7</sup> Mosquera, G. M., Marín, F., Stern, M., Bonnesoeur, V., Ochoa-Tocachi, B. F., Román-Dañobeytia, F., Crespo, P. (2022). *Progress in Understanding the Hydrology of High-Elevation Andean Grasslands Under Changing Land Use*. Science of the Total Environment, 804: 1501-12.

<sup>8</sup> Ochoa-Tocachi, B. F., Buytaert, W., De Bièvre, B., Célleri, R., Crespo, P., Villacís, M., Llerena, C. A., Acosta, L., Villazón, M., Gualpa, M., Gil-Ríos, J., Fuentes, P., Olaya, D., Viñas, P., Rojas, G., & Arias, S. (2016). *Impacts of Land Use on the Hydrological Response of Tropical Andean Catchments*. Hydrological Processes, 30: 4074-4089.



### 3. Implementación de zanjas de infiltración

Las zanjas de infiltración son pequeñas trincheras de tierra excavadas que siguen las curvas de nivel, tienen por objetivo interceptar, recolectar e infiltrar escorrentía superficial proveniente de terrenos adyacentes ladera arriba. Las zanjas de infiltración pueden utilizarse para retener y manejar la escorrentía superficial y, por ende, reducir la pérdida de suelo pendiente abajo, que se asocia con la erosión<sup>9</sup>. De hecho, la construcción de zanjas de infiltración en las laderas es una práctica que se realiza en varias regiones de montaña del mundo y que apunta a aumentar la recarga de acuíferos y a la conservación del suelo y el agua, incrementando su infiltración.

Se espera que las zanjas de infiltración generen beneficios positivos sobre la cantidad y calidad de agua, dependiendo, en gran medida, de cómo fueron diseñadas para responder a factores hidrológicos y físicos que influyen en la escorrentía y, a su vez, en la erosión del suelo. Esto requiere cuantificar las interacciones entre evapotranspiración, percolación, contenido de humedad y pérdida de suelo. El encharcamiento y saturación en las zanjas de infiltración afectará su capacidad de interceptar agua superficial y, por lo tanto, debe ser abordado por la metodología de cuantificación. En campo, es necesario garantizar el correcto mantenimiento y limpieza de las zanjas para asegurar su desempeño eficiente (Figura 4).

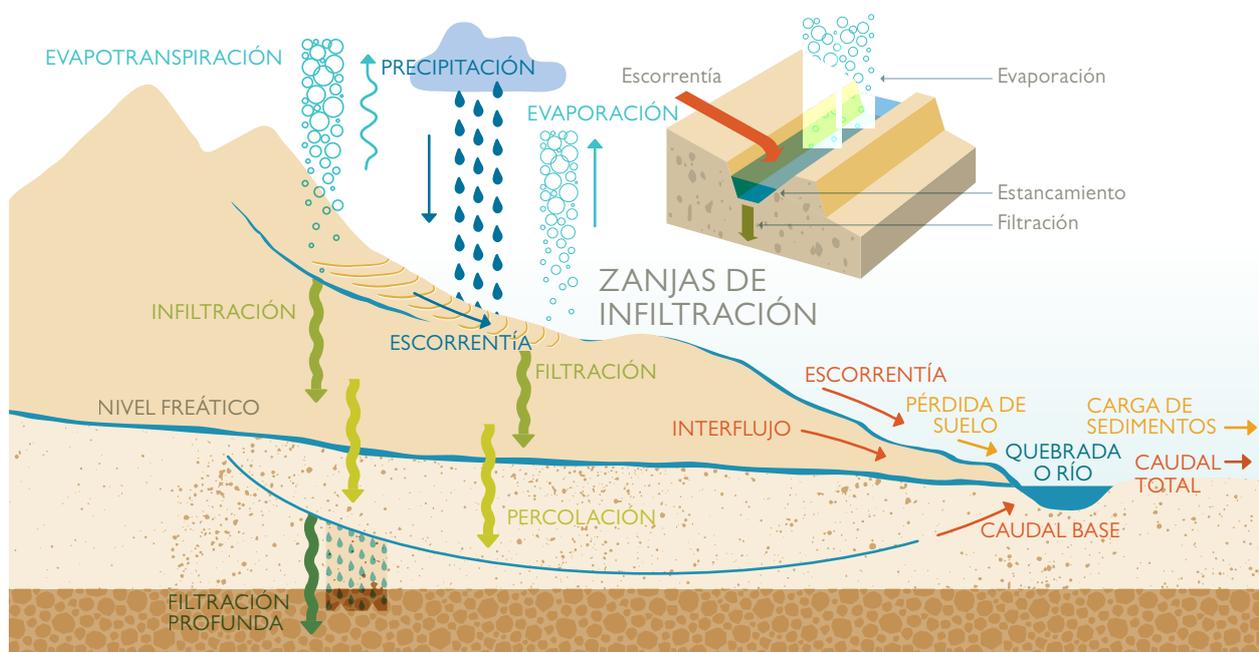


Fig. 4 Entradas y salidas de balance hídrico para la implementación de zanjas de infiltración. Fuente: Modificado de Foster et al., 2019.

<sup>9</sup> Locatelli, B., Homberger, J.-M., Ochoa-Tocachi, B. F., Bonnesoeur, V., Román, F., Drenkhan, F., & Buytaert, W. (2020). Impactos de las zanjas de infiltración en el agua y los suelos de los Andes: ¿Qué sabemos? Forest Trends, Lima, Perú.



## 4. Construcción y recuperación de amunas

Las amunas (también llamado mamanteo) son una práctica ubicada a gran altitud en los Andes que consiste en la desviación de agua superficial a zonas de alta permeabilidad de suelos. Esta práctica existe desde la época preincaica y se ha mantenido hasta la actualidad en algunas cuencas (por ejemplo, en la sierra de Lima). Los canales derivan aguas superficiales de las cabeceras de cuencas hacia áreas de infiltración en las montañas durante la estación lluviosa, con el objetivo de incrementar el rendimiento y duración de manantiales ubicados aguas abajo<sup>10</sup>.

Se espera que la construcción y restauración o mejoramiento de sistemas de amunas se traduzca en un aumento de los caudales base asociados con la recarga de agua subterránea<sup>11</sup>. Estos canales de desviación de agua construidos en las laderas transportan el agua con poca pendiente desde una quebrada hacia una zona con alta capacidad de infiltración (por ejemplo, sobre rocas fracturadas). Después de un cierto tiempo, el agua infiltrada podría volver a aflorar aguas abajo en microestanques construidos (qochas o balsas) o en manantiales naturales desde donde podría extraerse para fines de riego agrícola, o podrá seguir su rumbo pendiente abajo hacia un río (Figura 5).

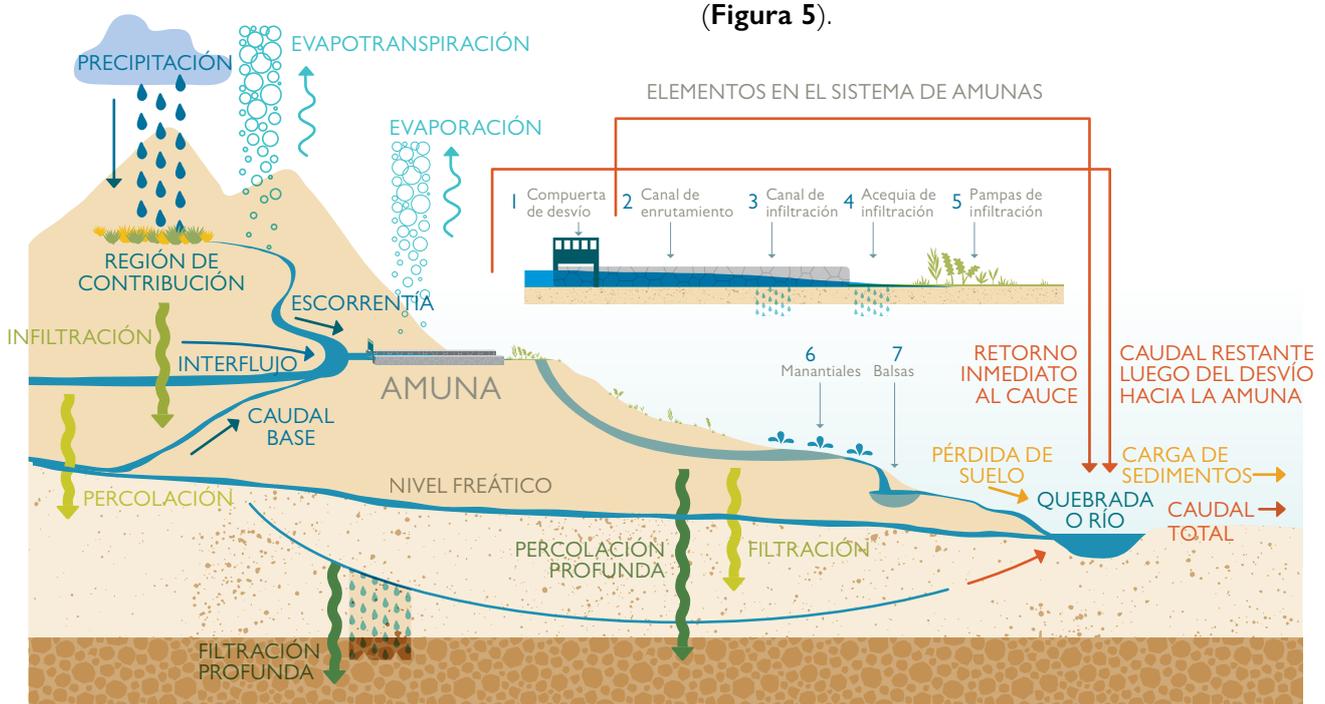


Fig. 5 Entradas y salidas de balance hídrico para la construcción y recuperación de amunas. Fuente: Adaptado de Ochoa-Tocachi et al., 2019.

<sup>10</sup> 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: 584-593.

<sup>11</sup> Kieser, M. S. & Fang, F. (2014). Restoration of Amunas: Quantifying Potential Baseflow Improvements. Technical Primer by Kieser & Associates, LLC, Kalamazoo, Michigan USA, elaborado para Forest Trends, Washington D. C., USA.



## 5. Construcción de Qochas (microreservorios permeables)

Las qochas son pequeños reservorios destinados a capturar, retener e infiltrar el agua de lluvia y la escorrentía. Estas han sido utilizadas a lo largo de la historia por poblaciones altoandinas y, generalmente, se implementan en un contexto de tierras agrícolas. El beneficio hídrico que las qochas puedan generar al caudal base en estación seca dependerá, en gran medida, de cómo su diseño responda a los factores hidrológicos y físicos que influyen en la evapotranspiración, evaporación, captura de escorrentía, recarga del agua subterránea y extracciones localizadas de agua. Las qochas, de manera más tradicional, no incluyen a los reservorios impermeables (por ejemplo, aquellos que tienen geomembranas o se asientan sobre suelos impermeables). Sin embargo, esta metodología puede usarse para dicho tipo de reservorios, estableciendo también los parámetros asociados al flujo subterráneo como nulos.

Desde una perspectiva de cuantificación, una qocha puede considerarse como dos sistemas adyacentes que interactúan entre sí: 1) un área contribuyente aguas arriba y 2) la qocha misma, que es un depósito para el almacenamiento de agua. Cada sistema puede ser representado y calculado por un balance hídrico. Cada balance hídrico es completamente contabilizado en las entradas y salidas hacia y desde el sistema durante un periodo de tiempo. Se identifican cuatro ingresos principales de agua en la qocha: 1) escorrentía del área de aporte, 2) flujo de agua subterránea, 3) precipitación directa sobre la qocha y 4) caudal adicional de ingreso, en caso existan acequias o derivaciones de agua construidas desde otras zonas hacia la qocha. Se identifican cuatro salidas principales de agua desde la qocha: 1) evaporación, 2) filtración hacia el suelo, 3) uso directo de agua de la qocha y 4) salida de agua por desborde. Se proyecta que la filtración aumentará el caudal base durante la estación seca, dependiendo del volumen disponible en el reservorio (Figura 6).



Fig. 6 Entradas y salidas de balance hídrico para la construcción de qochas. Fuente: Elaboración propia.



## 6. Restauración y conservación de humedales altoandinos

Los humedales son ecosistemas que se caracterizan por inundaciones y saturación del suelo permanentes o estacionales y que albergan especies características de vegetación hidrófila capaces de desarrollarse en estas condiciones. Bajo ciertas condiciones, los humedales son capaces de almacenar una gran cantidad de materia orgánica en el suelo (un suelo negro llamado turba), a los que se denominan turberas. Los humedales altoandinos, también llamados bofedales en Perú<sup>12,13</sup>, son en gran parte turberas. Los bofedales, humedales y turberas son reconocidos por los múltiples servicios ecosistémicos que proveen, incluyendo forraje de gran valor para la ganadería altoandina, regulación

hídrica para la cuenca o, a nivel global, el secuestro de carbono en los suelos.

El beneficio más común de los humedales —en términos de seguridad hídrica— se atribuye a menudo a su capacidad para reducir la escorrentía superficial producida por la precipitación a escala de paisaje y, por lo tanto, al incremento de flujos lentos en los cursos aguas abajo. En este contexto, los humedales se ven a menudo como una alternativa potencial al almacenamiento artificial de agua, aunque con menos capacidad para el control activo de su liberación. Muchas amenazas existen sobre los bofedales, como la extracción de la turba (champería) o el sobrepastoreo. Sin embargo, el manejo artificial de los humedales (incluyendo su irrigación y drenaje)<sup>14</sup> es posiblemente una de las prácticas más impactantes para estos ecosistemas. Esta metodología se enfoca principalmente en este manejo artificial y su remediación (Figura 7).

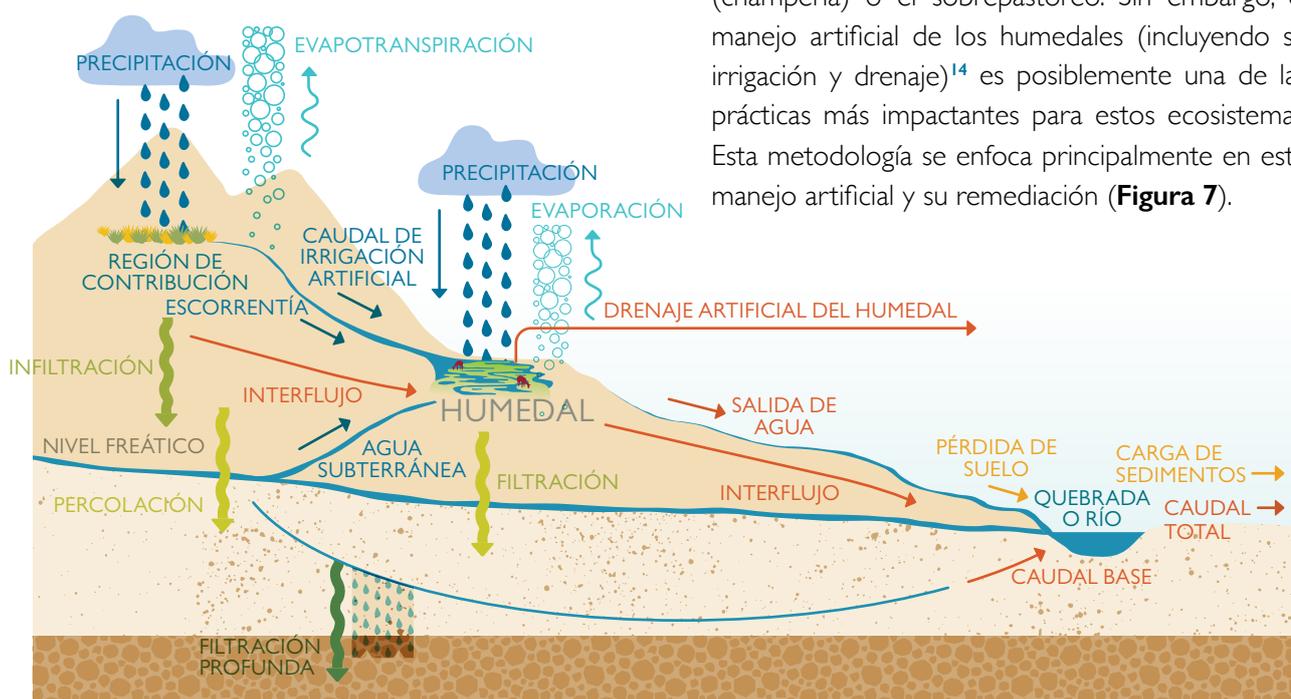


Fig. 7 Entradas y salidas de balance hídrico para la protección y restauración de humedales altoandinos. Fuente: Elaboración propia.

<sup>12</sup> Squeo, F., Warner, B., Aravena, R., & Espinoza, D. (2006). *Bofedales: High Altitude Peatlands of the Central Andes*. *Revista Chilena De Historia Natural*, 79: 245-255.

<sup>13</sup> Chimner, R. A., Bourgeau-Chavez, L. L., Grelik, S. L., Hribljan, J., Planas, A. M., Polk, M. H., Lilleskov, E., & Fuentealba, B. D. (2019). *Mapping Mountain Peatlands and Wet Meadows Using Multi-Date, Multi-Sensor Remote Sensing in the Cordillera Blanca, Peru*. *Wetlands*, 39: 1057-1067.

<sup>14</sup> Monge-Salazar M, Tovar C, Cuadros-Adriazola J, Baiker JR, Montesinos-Tubée DB, Bonnesoeur V, Antiporta J, Román-Dañobeytia F, Fuentealba B, Ochoa-Tocachi BF, Buytaert W (2022), *Ecohydrology and ecosystem services of a natural and an artificial bofedal wetland in the central Andes*. *Science of The Total Environment* 838: 155968.



## 7. SUPERCUBHIC 2.0 Integral. Combinación de diferentes intervenciones

Debido a que varias de las prácticas de manejo de cuencas involucran una combinación de intervenciones, se ha desarrollado una herramienta complementaria que permite un análisis integral. La metodología denominada "SUPERCUBHIC 2.0 Integral" integra los seis tipos de intervenciones sobre la infraestructura natural descritos anteriormente en un mismo ejercicio de evaluación. Esto permite realizar evaluaciones de proyectos más realistas que contemplan una combinación de diferentes prácticas en un mismo sitio.

Así, se consideran los beneficios e impactos de los cambios de cobertura y uso de suelo, a los que se atribuye su capacidad para reducir escorrentía y erosión o mejorar la regulación hídrica debido a la recuperación de la vegetación; al efecto que pueden tener las zanjas de infiltración para retener escorrentía superficial y, por tanto, flujo de sedimentos; al funcionamiento de los humedales altoandinos como reservorios naturales de agua en la región de contribución de la cuenca; al efecto de las amunas para absorber los excedentes de agua durante las estaciones húmedas y hacerlos disponibles durante las estaciones secas; y al rol de las qochas como almacenes reguladores de agua a la salida de las cuencas (**Figura 8**).



Fig. 8 Procesos hidrológicos considerados en el cálculo del balance hídrico en SUPERCUBHIC 2.0 Integral. Fuente: Elaboración propia





# Recomendaciones clave



- La metodología CUBHIC 2.0 permite una estimación rápida y práctica de los impactos hidrológicos y económicos de las intervenciones sobre la infraestructura natural para ofrecer una evaluación confiable, sencilla y robusta antes de utilizar evaluaciones más complejas y modelos más desarrollados que requieren mayor cantidad de datos y experticia en su uso.



- La metodología CUBHIC 2.0 puede contribuir a la selección y diseño de intervenciones sobre la infraestructura natural para el agua, pero el proceso de selección debe considerar también conocimientos y experticias científicas y locales para elegir la intervención que funcionaría mejor en el contexto social y ecológico específico, al tiempo que genera el beneficio hidrológico esperado y considerando compromisos y externalidades posibles. No se debe depender solamente en los resultados de CUBHIC para elegir intervenciones.



- Tal como se recomienda en la Guía de Modelación Hidrológica para la Infraestructura Natural<sup>14</sup>, desarrollada por el proyecto INSH, es necesario realizar análisis de sensibilidad e incertidumbre para mejorar las estimaciones e interpretación producidas por herramientas de simulación. Si bien realizar estos análisis en una hoja de cálculo no es sencillo, son partes esenciales de los análisis de riesgo y de las modelaciones hidrológicas robustas que deben ser considerados.



- Se debe evitar el riesgo de utilizar las calculadoras con los valores por defecto de manera directa. La metodología CUBHIC 2.0 más bien apoya la necesidad de generar datos de campo específicos de los casos de estudio con el fin de generar simulaciones más precisas.



- El monitoreo hidrológico y la modelación hidrológica son herramientas que van de la mano para generar estimaciones mucho más precisas de los impactos de las intervenciones sobre la infraestructura natural en los servicios ecosistémicos hídricos. Aplicar CUBHIC 2.0 con datos *in situ* mejorará considerablemente las estimaciones.

<sup>14</sup>Ochoa-Tocachi, B. F., Cuadros-Adriazola, J., Arapa Guzman, E., Aste Cannock, N., Ochoa-Tocachi, E., & Bonnesoeur, V. (2022). Guía de modelación hidrológica para la infraestructura natural. Forest Trends, Lima, Perú.







Foto: Ana Castañeda

[www.infraestructuranatural.pe](http://www.infraestructuranatural.pe)

El proyecto Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica promueve la conservación, restauración y recuperación de los ecosistemas a nivel nacional, formando alianzas con organizaciones públicas y privadas para reducir los riesgos hídricos como sequías, inundaciones y contaminación del agua.

El proyecto es promovido y financiado por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y el Gobierno de Canadá y ejecutado por Forest Trends, CONDESAN, la Sociedad Peruana de Derecho Ambiental (SPDA), EcoDecisión e investigadores del Imperial College London.

#### ¿Cómo citar este documento?

Ochoa-Tocachi, B. F., Cuadros-Adriazola, J., Bonnesoeur, V., Román, F., & Gammie, G. (2022). CUBHIC 2.0: Presentación de Metodología. Forest Trends, Lima, Perú.



Canada



Imperial College  
London