

## Valoración económica de los flujos hidrológicos y la biodiversidad en la cuenca Mariño, Abancay, Perú

### Economic assessment of hydrological flows and biodiversity in the Mariño basin, Abancay, Peru

Carlos Moreano Huayhua<sup>1</sup>; Roger Alfredo Loyola Gonzáles<sup>2</sup>

1 Autoridad Nacional del Agua, Jr. Junín N°539, Abancay, Perú.

2 Universidad Nacional Agraria La Molina, Av. La Molina s/n Lima, Perú.

\*Autor correspondiente: [cmoreano@ana.gob.pe](mailto:cmoreano@ana.gob.pe) (C. Moreano Huayhua).

ID ORCID de los autores

C. Moreano Huayhua:  <http://orcid.org/0000-0002-0820-1419>

R. A. Loyola Gonzáles:  <http://orcid.org/0000-0003-1510-6513>

#### RESUMEN

Como consecuencia del sobrepastoreo en la cuenca Mariño, viene disminuyendo la cobertura vegetal. Para plantear soluciones se estudiaron los pastizales, bofedales y bosques nativos donde predominan especies nativas de flora. También se presentan las costras biológicas (biocrusts) que permiten una adecuada regulación hídrica. La importancia de la investigación es cuantificar en términos monetarios el valor de los ecosistemas, el objetivo fue determinar el valor económico de los flujos hidrológicos, tomando como base a la biodiversidad funcional, para lo cual se determinó la oferta hídrica, la demanda de agua para fines agrarios, poblacionales y finalmente la valoración económica del agua. En cuanto a la oferta hídrica en los ecosistemas de pastizal, bofedal y bosque nativo se obtuvo un volumen de 4'264'549 m<sup>3</sup>/año, la demanda hídrica asciende a 4'498'956 m<sup>3</sup>/año. Seguidamente, la valoración económica del servicio de provisión hidrológica permitió determinar que el valor del agua en S/. 0,51 el m<sup>3</sup>, el mismo que permitirá la generación de políticas públicas encaminadas a la conservación de la cabecera de cuenca. Con base a estos resultados, se propone realizar actividades de manejo y conservación, tales como la clausura de praderas, para la recuperación de la cobertura vegetal, conservación de bofedales donde se encuentran los biocrusts y finalmente la reforestación con especies nativas.

**Palabras clave:** Valoración económica; biodiversidad funcional; sobrepastoreo; costo oportunidad; servicios ecosistémicos.

#### ABSTRACT

As a consequence of overgrazing in the Mariño basin, vegetation cover has been decreasing. To propose solutions, grasslands, wetlands and native forests where native species of flora predominate were studied. Biological crusts (biocrusts) that allow adequate water regulation are also presented. The importance of the research is to quantify in monetary terms the value of the ecosystems, the objective was to determine the economic value of the hydrological flows, taking as a basis the functional biodiversity, for which the water supply, the demand for water for agrarian and population purposes and finally the economic valuation of water. Regarding the water supply in the grassland, wetland and native forest ecosystems, a volume of 4'264'549 m<sup>3</sup>/year was obtained, the water demand amounts to 4'498'956 m<sup>3</sup>/year. Next, the economic valuation of the hydrological provision service allowed to determine that the value of the water in S/. 0.51 by m<sup>3</sup>, the same that will allow the generation of public policies aimed at conserving the headwaters of the basin. Based on these results, it is proposed to carry out management and conservation activities, such as the closure of prairies, for the recovery of the vegetation cover, conservation of wetlands where the biocrusts are found and finally the reforestation with native species.

**Keywords:** Economic valuation; functional biodiversity; overgrazing; opportunity cost; ecosystem services.

Recibido: 21-05-2021.

Aceptado: 16-07-2021.



Esta obra está publicada bajo la licencia [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

## INTRODUCCIÓN

La investigación trata de la valoración económica de los flujos hidrológicos y la biodiversidad en la cuenca Mariño, en la ciudad de Abancay.

En las cabeceras de la cuenca del río Mariño actualmente se vienen generando una serie de prácticas que alteran el normal funcionamiento de los ecosistemas hídricos (zonas de recarga, bofedales, praderas naturales), tales como el sobrepastoreo, tala de bosques nativos, quema de pajonales, que vienen generando problemas de erosión de los suelos, mayor escorrentía y menor infiltración (PRODERN, 2018).

La alteración de la cobertura vegetal disminuye las posibilidades de infiltración, ocasionando un incremento en la escorrentía durante las épocas de precipitación (Debb, 1992; Álvarez, 1995).

Las dinámicas de cambio de uso del suelo en los andes están relacionadas a procesos de cambio ambiental y social, los cambios de uso de suelo generan externalidades negativas a largo plazo (Denevan, 2001; Foley et al., 2005; Kay, 2009).

Muchos estudios realizados, en algunos casos con poca información, se abstuvieron de proporcionar valores económicos para los servicios ecosistémicos hídricos (Campbell & Tilley, 2014; Maes et al., 2012; Terrado et al., 2014).

Estudios que evidencian la valoración monetaria existente es limitada, por ejemplo, el TEEB (La economía de los ecosistemas y la biodiversidad) la base de datos de valoración (Van der Ploeg y De Groot, 2010) proporciona solo ocho referencias y diez estimaciones de estudios de valoración para los beneficios relacionados con el agua proporcionados por los bosques. Las valoraciones de los ecosistemas relacionados con el agua son difíciles de determinar debido a la falta de comprensión de la dinámica de los ecosistemas hídricos y las interacciones entre la tierra y los ecosistemas hídricos (Brauman, 2015; Schaafsma et al., 2015).

El crecimiento de las zonas urbanas hace que se tenga mayor presión por el acceso al agua, generando fallas en el suministro por parte de las entidades prestadoras del servicio (Biniam et al., 2018).

Los beneficios que producen los ecosistemas son diversos, el enfoque de ecosistemas permite valorar la biodiversidad y los servicios ecosistémicos, para ello la valoración económica es una herramienta que permita una mejor toma de decisiones (Lusardi et al., 2020). Los modelos hidroeconómicos puede ser usada para guiar el diseño y la aplicación de políticas que permitan la integración de los aspectos biofísicos de las fuentes de agua y su interacción con la tierra y los recursos hídricos superficiales (Taher Kahil et al., 2016).

Otro modelo que integra los aspectos hidrológicos, ecológicos y económicos está basado en el modelo de redes Bayesianas, encargado de evaluar los impactos biofísicos y económicos de escenarios de gestión de las cuencas hidrográficas (Kragt, 2016). Un enfoque de optimización mediante modelos de hidroeconomía permite evaluar la cantidad y calidad de agua a lo largo de un período de planificación del manejo de los recursos hídricos (Davidsen et al., 2015).

Los principales retos en los modelos hidro-económicos son los límites para la comprensión de las funciones físicas, ecológicas y económicas del medio ambiente; y el tratamiento de la incertidumbre (Momblanch et al., 2016).

Biodiversidad es un término usado para abarcar toda la variabilidad encontrada en los organismos vivos en sistemas terrestres y acuáticos, donde se puede analizar y vincular a los servicios ecosistémicos (Díaz et al., 2006).

En cuanto a estudios sobre biodiversidad funcional se tienen experiencias como las parcelas permanentes instaladas de tamaño variable (1 m<sup>2</sup> a 1 ha), para el monitoreo de especies vegetales y funcionales y diversidad filogenética en el nevado Santa Isabel (Cuellar, 2017) y en las cumbres del páramo del parque nacional Cucuy (Cuesta et al., 2017), así como parcelas permanentes en bosques andinos instaladas en varias regiones de Colombia, cuyo objetivo permite determinar procesos de regulación hídrica y recuperación de cobertura vegetal (Duque et al., 2015; Quintero et al 2017; Avella et al., 2017). Asimismo, se tienen programas como en el Santuario Iguaque en Colombia donde se vienen monitoreando componentes críticos de la biodiversidad, como la diversidad microbiana del suelo (Ichii et al., 2019).

Es poco conocido el rol de la biodiversidad en los diferentes componentes del ciclo del agua. La diversidad de plantas, en forma de diversidad funcional y estructural, puede desempeñar un papel importante en la evapotranspiración, escorrentía superficial y subterránea (Chapin et al., 2002; Díaz et al., 2006).

La biodiversidad es un concepto ecológico altamente complejo y abstracto. Aunque no es una entidad física, influye en el bienestar humano de múltiples maneras (Bartkowski et al., 2015).

Las características del suelo, el tipo de biocrusts y la variabilidad temporal asociada con el tipo de lluvia, el antecedente de agua del suelo y las condiciones ambientales regulan el papel de los biocrusts en los procesos hidrológicos (Chamizo et al., 2015).

Los biocrusts (costras biológicas), desempeñan múltiples funciones en la prestación de servicios de los ecosistemas: Control, regulación del agua y regulación del clima y calidad del aire. Los biocrusts como comunidad tienen un valor intrínseco (estético y cultural) que debe ser valorado por los humanos. Sin embargo, estudios realizados demuestran que existe una brecha de conocimiento general con respecto a los servicios proporcionados por los ecosistemas dominados por biocrusts y los beneficios derivados para la sociedad (Rodríguez-Caballero et al., 2017).

Al reconocer el valor de la biodiversidad para mantener flujos de agua limpios y regulares, los usuarios del agua ingresan a un fondo que se capitaliza y este se usa para preservar los ecosistemas naturales y restaurar los paisajes agrícolas. Los proveedores de servicios son compensados a través del fondo. Los fondos de agua comparten algunas características, pero se pueden ajustar para diferentes entornos

institucionales, legales y económicos, como lo demuestran los estudios de caso de Ecuador, Colombia y Brasil (Goldman-Benner et al., 2013). La protección de la biodiversidad y la mejora de la oferta y el acceso equitativo a los servicios de los ecosistemas es un interés mundial vital para mantener un planeta saludable y brindar beneficios a las personas. La valoración económica para los servicios de los ecosistemas, sobre el costo global de la degradación de la tierra, los beneficios y costos totales de los sistemas de producción de alimentos, necesita una evaluación integral que vaya más allá del valor monetario (Zhang et al., 2019).

Un tema importante en la valoración de la biodiversidad es lograr una mejor comprensión de cómo la conservación de la biodiversidad afecta las actividades económicas y el bienestar humano. Cuantificar los beneficios económicos de la

biodiversidad para el bienestar de la sociedad no es sencillo (Daniels et al., 2018).

El objetivo de este trabajo es valorar económicamente los flujos hidrológicos, así como la biodiversidad asociada a los recursos hídricos en la cuenca del río Mariño; mediante la generación de caudales en tres ecosistemas que fueron pastizal y/o pajonal, bofedal y forestación nativa; la importancia de la investigación tiene que ver con la determinación de la relación que existe entre la cobertura vegetal considerada como biodiversidad funcional, con relación a procesos de infiltración de agua, por ende recarga del acuífero, para luego obtener agua en fuentes hídricas como manantiales, lagunas, ríos y quebradas, y finalmente determinar el valor del agua, que permita contribuir a la generación de políticas públicas encaminadas a la conservación de los ecosistemas hídricos en cabecera de cuenca.

## MATERIAL Y MÉTODOS

En esta sección se deben describir todos los procedimientos y métodos utilizados en el estudio. Se pueden incluir uno o más anexos para describir los detalles de la disposición experimental, desarrollos matemáticos, encuestas, etc.

### Área de estudio

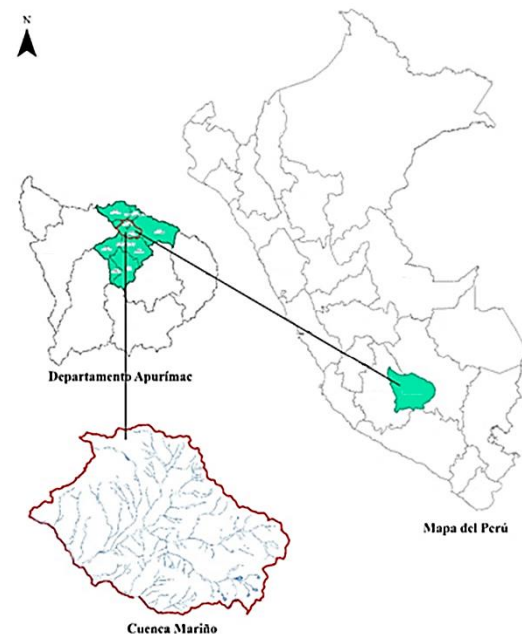
La unidad hidrográfica de Mariño, ubicado en el distrito de Abancay, provincia de Abancay, departamento de Apurímac (Figura 1), alberga una población de 72, 277 habitantes (INEI, 2018), que vienen a ser usuarios del servicio de agua para riego, consumo humano, entre otros usos. Tiene un área de 244 km<sup>2</sup>, y una altitud media de 2444 m, dentro de esta cuenca se ubican los distritos de Abancay y Tamburco, en este ámbito se desarrolló la investigación relacionada con la valoración de los flujos hidrológicos y biodiversidad funcional asociada a los recursos hídricos.

### Disponibilidad hídrica en la cuenca

Con la finalidad de cumplir con el objetivo de esta investigación, la metodología tiene tres etapas que se aplicaron, estas permitieron estimar el valor promedio del servicio ambiental hídrico que proveen los ecosistemas mediante la biodiversidad funcional que se ubican en la cabecera de cuenca del río Mariño. Estas etapas son: (i) determinar la oferta hídrica que proveen los ecosistemas de bofedal, pajonal y bosques nativos (ii) calcular la demanda de agua para fines agrarios; y (iii) valoración económica del servicio ambiental y flujos hidrológicos.

La estimación de la disponibilidad de agua en la cuenca Mariño se realizó utilizando la metodología de cuantificación de beneficios hidrológicos de intervenciones en cuencas (CUBHIC). El uso de esta metodología permite cuantificar la oferta hídrica y demás beneficios hidrológicos, el mismo que toma en consideración parámetros como características hidrológicas del suelo, características de la vegetación que afecta a la evapotranspiración y la escorrentía; este parámetro es muy importante toda vez que se considera a la

biodiversidad funcional que forma parte de la cobertura vegetal y que tiene relación directa con la cuantificación de los beneficios hidrológicos que presentan los ecosistemas en cabecera de cuenca.



**Figura 1.** Área de estudio donde se desarrolló la investigación.

### Valor de captación de agua por los ecosistemas

Al realizar la valoración del agua como servicio ambiental ofrecido por la cobertura vegetal en cada ecosistema, se debe tener en cuenta el valor de la productividad de la cobertura vegetal, para la presente investigación se tomará en consideración tres ecosistemas tales como pastizales altoandinos, bofedales y/o humedales altoandinos y bosques nativos, en función de la captación (valor de uso directo) de agua, además de otros servicios como belleza escénica, biodiversidad y otros.

Para realizar la estimación del valor de captación como un componente que determina la produc-

tividad hídrica de la cobertura vegetal, se requiere: El volumen anual de agua captada y fijada por la cobertura vegetal en las zonas de recarga de la cuenca, calcular el costo de oportunidad del uso de la tierra en cabeceras de cuenca, ponderación de la importancia de la cobertura vegetal en términos de su productividad hídrica, al compararla con otros servicios de la biodiversidad.

Asimismo, es necesario tomar en cuenta el efecto positivo que tiene la cobertura vegetal sobre la calidad del agua de escorrentía superficial. La siguiente ecuación permite determinar el valor de captación de la cobertura vegetal:

$$VC = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i \cdot Bi \cdot Abi}{Va} \quad (1)$$

Dónde VC: Valor de captación hídrica de la cobertura vegetal (Soles/m<sup>3</sup>) (cantidad + calidad); Bi: Costo de oportunidad de cualquier actividad económica que compite con la cobertura vegetal por el uso del suelo en la cuenca (S/ /ha/año); Abi: Área bajo cobertura vegetal en la cuenca i (ha); Va: Volumen de agua captada en la cuenca i (m<sup>3</sup>/año);  $\alpha_i$ : Importancia de la cobertura vegetal en la cuenca i en función de la cantidad y calidad del recurso hídrico  $0 \leq \alpha \leq 1$ .

#### Valor de restauración de la cobertura vegetal por ecosistema

La recuperación de la cobertura vegetal en los ecosistemas que sufrieron degradación, viene siendo una actividad que ayuda a la conservación de los recursos hídricos superficiales y subterráneos, asimismo se evita la escorrentía y erosión de suelos. Los beneficios que genera estas actividades llevan un costo que requiere ser considerado dentro de la estructura de valoración económica para el uso del agua, con la finalidad de

otorgar recursos financieros que permitan realizar actividades de manejo de cuencas tales como protección, recuperación y conservación de las cabeceras de cuenca (Barrantes, 2010).

Con base a las características de los ecosistemas como pastizales, bofedales y bosques nativos, el costo de restablecimiento debería ser similar al de recuperar el ecosistema para dejarlo en condiciones idénticas a las que mantenía antes de ser intervenido, cabe mencionar que esos costos no están estrictamente relacionados en función del recurso hídrico, por lo que se tiene que realizar una ponderación del total de esos costos que se relacionan con la protección del recurso hídrico, calculando el número de hectáreas que deben ser recuperadas, los costos de restauración considerando una situación similar a la del bosque natural antes de ser degradado, ponderación de la importancia del bosque en términos de productividad hídrica, volumen hídrico captado en la cuenca.

En consecuencia, para determinar costo de restauración de la cobertura vegetal que conlleve a las medidas de recuperación, protección, conservación y mantenimiento de la biodiversidad en cuencas, se desarrolla mediante la siguiente ecuación:

$$VRE = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i \cdot Cr \cdot Arih}{Oci} \quad (2)$$

Dónde: VRE: Valor de restauración de la cobertura vegetal en cabecera de cuenca (Soles/m<sup>3</sup>); Cr: Costos para la actividad j destinada a la restauración del bosque en la cuenca i (S/ha/año); Arih: Área a restaurar en la cuenca i (ha); Va: Volumen de agua captada en la cuenca i (m<sup>3</sup>/año);  $\alpha_i$ : Importancia de la cobertura vegetal en la cuenca i en función de la cantidad y calidad del recurso hídrico  $0 \leq \alpha \leq 1$ .

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los tres ecosistemas evaluados hacen un total de 960 hectáreas, de los cuales se obtuvieron los siguientes resultados, la escorrentía total es de 181,23 mm/año, la percolación es de 1492,26 mm/año, el volumen total de escorrentía es de 559,855 m<sup>3</sup>/año, volumen total de percolación es de 3,165,640 m<sup>3</sup>/año, finalmente el volumen total de generación de caudales (oferta hídrica) es de 4,267,549 m<sup>3</sup>/año.

El ecosistema que genera mayor oferta hídrica es el pastizal altoandino que tiene 800 ha, que genera un volumen de percolación de 2,396,021 m<sup>3</sup>/año, y un volumen total de 3,396,021 m<sup>3</sup>/año, el

ecosistema de bofedal tiene un aporte de 185,830 m<sup>3</sup>/año, que no deja de ser importante dado que también aporta al volumen total de la oferta hídrica para cubrir la demanda de agua para uso agrario y poblacional en la cuenca media y alta del río Mariño.

#### Valor de captación de agua por los ecosistemas

Para la valoración de la productividad hídrica en cuanto a la cobertura vegetal se tomó en consideración los ingresos generados por la actividad agrícola que predomina en la cuenca alta del río Mariño.

**Tabla 1**  
Oferta hídrica total considerando los tres ecosistemas evaluados

Id	Tipo de ecosistema	Área del ecosistema (ha)	Escorrentía (mm/año)	Percolación (mm/año)	Volumen escorrentía (m <sup>3</sup> /año)	Volumen percolación (m <sup>3</sup> /año)	Volumen Total (m <sup>3</sup> /año)
1	Pastizales altoandinos	800	57.61	366.88	460,946.36	2,396,021.38	3,396,021.38
2	Bofedales	25	61.81	681.5	15,454.50	170,376.34	185,830.84
3	Bosques nativos	135	61.81	443.88	83,454.31	599,242.81	685,697.11
	Total	960	181.23	1,492.26	559,855.17	3,165,640.53	4,267,549.33

De acuerdo a las condiciones de producción en la cuenca, se determinó el costo de oportunidad para el uso de la tierra en 809.36 S/ha/año, valor obtenido de los ingresos que anualmente puede obtener un productor en la cuenca alta.

El valor obtenido de 809.36 S/ha/año por la actividad agrícola, significa que los productores deberían recibir este monto por año para cubrir o subsidiar la producción del cultivo de papa en la zona, a cambio de que sus terrenos estén destinados a la conservación y provisión de servicios hidrológicos.

Otro de los valores necesarios para realizar el cálculo del valor de captación de agua por los ecosistemas, es la importancia de la cobertura vegetal en la cabecera de cuenca del río Mariño que es de 86 %, con base a la población encuestada, los pobladores de la cuenca consideran a la cobertura vegetal y ecosistemas de montaña como proveedores de agua, asimismo consideran de importancia su conservación, este valor también toma en consideración aspectos como la mejora de procesos de infiltración y disminución de escorrentía, en ese sentido este es un valor alto y considerable para el futuro valor económico del agua.

El siguiente dato necesario para el cálculo del valor de captación de agua por los ecosistemas, es determinar cuál es el área de interés hídrico en la cuenca, debido toda vez a que en estos espacios existe una gran cobertura vegetal compuesta por ecosistemas que albergan una diversidad de especies vegetales, los mismos que se comportan como protectoras y proveedoras del servicio ambiental hídrico, el cálculo se realizó con base al software Arc Gis 9.9, con el que se determinó el área para los ecosistemas de pastizal, bofedal y bosque nativo.

Otro de los valores necesarios para el cálculo del valor de captación de agua por los ecosistemas, es determinar cuál es el volumen de agua disponible y real de la cuenca, para lo cual se utilizó la metodología de cuantificación de beneficios

hidrológicos de intervenciones en cuencas (CUBHIC), tomando en consideración los ecosistemas de pastizal, bofedal y bosque nativo. El valor de captación de agua es uno de los de mayor importancia para el cálculo del valor económico real del agua.

Los valores de captación mostrados en la Tabla 2, se obtuvieron aplicando la fórmula 1, el mismo que considera multiplicar el valor de la importancia de la cobertura vegetal, el costo de oportunidad de la actividad que compite con la cobertura vegetal y el área bajo cobertura vegetal, dividido entre el volumen de agua captada en la cuenca, estos valores se determinaron para los tres ecosistemas que se compararon en la cuenca alta del Mariño.

El mayor aporte de producción de agua lo tienen los ecosistemas de pastizal y bosque nativo, mientras que el ecosistema de bofedal genera menor producción de agua, como se puede evidenciar en los resultados mostrados en la tabla 2, sin embargo, el ecosistema de bofedal muestra mayor valor de captación de S/. 0.75/m<sup>3</sup>.

Económicamente los ecosistemas de pastizal y bofedal generan mayor valor de captación de agua en comparación con el ecosistema de bosque nativo, esto puede atribuirse a que las especies nativas de bosque nativo como son las *Polylepis* sp, presentan un ritmo de crecimiento muy lento por lo que sus beneficios ecosistémicos hídricos tienen una respuesta después un periodo prolongado después de su instalación.

Finalmente se puede concluir que si económicamente los tres ecosistemas no presentan valores de captación de agua superiores a los costos de protección y mantenimiento de cada ecosistema, estos espacios ubicados en cabecera de cuenca deben de ser manejados de manera integral con la finalidad de evaluar y valorar sus beneficios de manera integral, que consideren no solo beneficios hidrológicos, sino también el balance de ecosistemas propios de alta montaña, la belleza escénica, el valor cultural, entre otros servicios ecosistémicos.

**Tabla 2**  
Valor de captación de agua en tres ecosistemas de la cuenca Mariño (S/m<sup>3</sup>)

Tipo de Ecosistema	Costo de oportunidad de la actividad que compite con la cobertura vegetal (S/ha/año)	Área de importancia hidrológica (ha)	Volumen de agua producida por el ecosistema (m <sup>3</sup> /año)	Importancia de la cobertura vegetal	Valor de captación de la cobertura vegetal (S/m <sup>3</sup> )	
Pastizal	2019	809	800	3,396,021	0,86	0,16
	2020	749	800	3,396,021	0,86	0,15
	2021	694	800	3,396,021	0,86	0,14
	2022	642	800	3,396,021	0,86	0,13
	2023	595	800	3,396,021	0,86	0,12
	Total	3489				0,71
Promedio					0,14	
Bofedal	2019	809	200	185,831	0,86	0,75
	2020	749	200	185,831	0,86	0,69
	2021	694	200	185,831	0,86	0,64
	2022	642	200	185,831	0,86	0,59
	2023	595	200	185,831	0,86	0,55
	Total	3489				3,23
Promedio					0,65	
Bosque nativo	2019	809	135	685,697	0,86	0,14
	2020	749	135	685,697	0,86	0,13
	2021	694	135	685,697	0,86	0,12
	2022	642	135	685,697	0,86	0,11
	2023	595	135	685,697	0,86	0,10
	Total	3489				0,59
Promedio					0,12	

**Tabla 3**

Valor promedio de captación de agua por la cobertura vegetal de la cuenca Mariño (S/año)

Tipo de Ecosistema	Año	Volumen de agua producida por el ecosistema (m <sup>3</sup> /año)	Valor de captación de la cobertura vegetal (S/m <sup>3</sup> )	Valor promedio de captación de agua por la cobertura vegetal (S/año)
Pastizal	2019-2023	3,396,021	0,14	480,019
Bofedal	2019-2023	185,830	0,65	120,004
Bosque nativo	2019-2023	685,697	0,12	81,003

Económicamente los ecosistemas de pastizal y bofedal generan mayor valor de captación de agua en comparación con el ecosistema de bosque nativo, esto puede atribuirse a que las especies de bosque nativo como son las *Polylepis sp*, presentan un ritmo de crecimiento muy lento por lo que sus beneficios ecosistémicos hídricos tienen una respuesta después de un periodo prolongado a su instalación.

Finalmente se puede concluir que, si económicamente los tres ecosistemas no presentan valores de captación de agua similares entre ecosistema, estos espacios ubicados en cabecera de cuenca deben de ser manejados de manera integral con la finalidad de evaluar y valorar sus beneficios, que consideren no solo beneficios hidrológicos, sino también el balance de ecosistemas propios de alta montaña, la belleza escénica, el valor cultural, entre otros servicios ecosistémicos.

#### Valor de restauración de la cobertura vegetal

El valor de restauración de la cabecera de cuenca del río Mariño, tiene relación con los costos para desarrollar las diferentes actividades como la reforestación. Estos costos contemplan todos los gastos anuales que se deben de realizar, tales como actividades de reforestación, clausura de praderas, protección de bofedales, revegetación con pastos nativos, entre otros tomando en consideración un período de 5 años. Para llegar a obtener un sistema óptimo de recuperación y restauración de los ecosistemas degradados en la cuenca.

#### a. Recuperación de la cobertura vegetal mediante clausura de praderas

La clausura de praderas es una actividad que consiste en el cercado de áreas de ecosistemas de bofedal y pajonal de puna que fueron degradados por efectos del sobrepastoreo, agricultura intensiva, quema de praderas, entre otras actividades, con los cercos de clausura se recupera la cobertura vegetal compuesta por especies como la *Wira wira (Belloa kunthiana)*, *Cuatrecasiella isemii*, *Trichophorum* y *wemeria pygmaea*, pertenecientes a las familias de las Asteraceas y Cyperaceas, así como la *Festuca Dolicophyla*, *Stipa Ichu*, entre otras especies propias de los ecosistemas en estudio, los costos de recuperación se calcularon en S/. 3108 /ha/año, valor que se determinó con base a estudios realizados sobre costos de producción, instalación y protección de actividades, relacionados a la actividad de clausura de praderas.

#### b. Reforestación de áreas degradadas con especies nativas

Cabe mencionar que para la recuperación de la cobertura vegetal es muy importante realizar con especies nativas del lugar, el mismo que permita la conservación de la biodiversidad de los ecosistemas degradados, de esta manera los bosques nativos permitirán una mejor interceptación de las precipitaciones, disminución de la escorrentía y el incremento de la infiltración. La especie considerada para la reforestación es la *Keuña (Polylepis incana)*, propia de la zona de Rontoccocha, en áreas cuyas características edafológicas y climatológicas son propicias para el desarrollo de esta especie, el costo de reforestación con especies nativas es de S/.4534/ha/año, los costos anuales de reforestación para la recuperación de la cobertura vegetal se muestra en la Tabla 4.

#### c. Revegetación con pastos nativos

La ganadería es una de las actividades económicas que genera problemas de degradación de los recursos naturales principalmente por el sobrepastoreo y compactación de los suelos, en ese sentido la actividad de siembra de *Stipa Ichu*, permite la recuperación de la cobertura vegetal en la cabecera de cuenca. El costo de restauración de pastizales se calculó en S/. 3459/ha/año, valor que es utilizado para determinar el valor de restauración de la cobertura vegetal, el costo calculado se basa en la elaboración de costos de producción, instalación y protección de la actividad de revegetación. El mínimo valor de restauración es de S/. 0.05/ m<sup>3</sup>, en el ecosistema de pastizal mientras que el valor más alto es de S/. 0.22/m<sup>3</sup> obtenido en el ecosistema de bofedal, aunque el área a recuperar es menor, se obtiene una rentabilidad económica mayor por la recuperación del ecosistema de bofedal.

#### Valor del agua

El valor del agua determinado para la cuenca del río Mariño es la diferencia de los diferentes valores obtenidos en cada componente que se tomó para la valoración económica, tales como aspectos ecológicos de los ecosistemas de bofedal, pajonal de puna y bosques nativos que tiene una variedad de especies que forman parte de la biodiversidad funcional, desde el punto de vista de los servicios hidrológicos que permiten una mayor recarga del acuífero por ende en mayor oferta hídrica en la cuenca media y baja.

**Tabla 4**Valor de restauración en tres ecosistemas de la cuenca Mariño (S/m<sup>3</sup>)

Tipo de Ecosistema	Costo de la actividad destinada a la recuperación de la cobertura vegetal (S/ha/año)	Área a recuperar en la zona de importancia hídrica (ha)	Volumen de agua producida por el ecosistema (m <sup>3</sup> /año)	Importancia de la cobertura vegetal	Valor de restauración de la cobertura vegetal (S/m <sup>3</sup> )
Pastizal	3,459	60	3,396,021	0,86	0,05
Bofedal	3,108	15	185,830	0,86	0,22
Bosque nativo	4,534	22	685,697	0,86	0,13

En la tabla 5 se muestra los resultados de los valores obtenidos en cada componente de la valoración económica.

**Tabla 5**  
Valoración del agua por componentes

Componentes	Tipo de ecosistema		
	Pastizal	Bofedal	Bosque nativo
Valor de captación	0,14	0,65	0,12
Valor de recuperación	0,05	0,22	0,13
Valor real del agua	0,09	0,43	-0,01

Para determinar el valor del agua por componente y por ecosistema se realizó mediante una diferencia simple entre el valor de captación y el valor de recuperación en una primera etapa, para el caso del ecosistema de pastizal se tiene un valor de captación de  $S/. 0,14/m^3$  y un valor de  $S/. 0,05/m^3$  para el valor de recuperación, del cual se obtiene una diferencia de  $S/. 0,09/m^3$ , el mismo que es el valor real del agua, se sigue el mismo procedimiento para los demás ecosistemas.

En la segunda etapa se determinó el valor real del agua para los beneficiarios en la parte media y baja de la cuenca del Mariño que es de  $S/.0,52 /m^3$ , el mismo que resulta de la suma de los valores reales del agua, este dato obtenido se encuentra por encima de lo que actualmente cobra la Junta de Usuarios del Sector Hidráulico Menor Medio Apurímac Pachachaca que es de  $S/.0,0014/m^3$ , por el uso del agua en el sector agrícola, es decir que el agua está subvalorado, por lo que actualmente solo se cobra por la prestación del servicio mas no por lo que cuesta producir el recurso hídrico en cabecera de cuenca, donde existe una relación directa de proteger la biodiversidad funcional que proveen los ecosistemas de pastizal, bofedal y bosque nativo con la producción de agua. Estudios similares como el que se realizó en la microcuenca del río Blanco Ecuador se obtuvo un valor real del agua de USD  $0,08/m^3$ , monto superior al que actualmente cobra el municipio que es de USD  $0,024/m^3$ , por lo que el estudio recomienda cobrar el valor real del agua para realizar actividades de

conservación de la cuenca y generar mecanismos de compensación a los dueños de los terrenos de la microcuenca (Ariolfo et al., 2018). Mediante el estudio de evaluación del servicio ambiental hídrico en la cuenca del río Tempisque (Costa Rica) y su aplicación al ajuste de tarifas, se determinó un valor total del agua de USD  $0,0056/m^3$  (Barrantes 2010), valor que se utilizó para ajustar ambientalmente tarifas y cánones para sustentar las siguientes actividades como conservación de la cobertura actual de bosques a través del cobro del valor de captación, restauración de cobertura en zonas degradadas de importancia hídrica a través del valor de restauración y el desarrollo de obras de infraestructura social tales como embalses y plantas de tratamiento de agua, investigación y educación ambiental a través del valor del agua como insumo de la producción.

En el estudio sobre valoración económica de los servicios ambientales hidrológicos en El Salto, Pueblo Nuevo, Durango, se determinó el costo unitario de producción de agua en USD  $0,12/m^3$ , para el primer año y USD  $0,097/m^3$  para los años restantes (Silva-Flores et al. 2010), los costos considerados no toman en cuenta los gastos de administración, mantenimiento, apertura, operación ni tampoco tratamiento de aguas residuales, por lo que es posible que al final los costos se eleven significativamente.

El estudio sobre valoración económica del recurso hídrico como un servicio ambiental de las zonas de recarga en la subcuenca del río Acelhuate, El Salvador, determinó que el servicio ecosistémico del bosque que pone a disposición de la sociedad importantes volúmenes de agua es valorado en USD  $0,008/m^3$ ; mientras que el valor de restauración de la subcuenca, en aquellas zonas de interés para la recarga hídrica, es de USD  $0,12/m^3$ , y el del agua como insumo de la producción es de USD  $0,0137/m^3$ , el estudio recomienda que estos valores deben de asociarse a la demanda de cada sector económico y focalizarse, sobre todo, en la población que utiliza el agua para satisfacer necesidades como el agua para consumo y la agricultura (Calles, 2014).

**Tabla 6**  
Comparación del valor de agua determinado en estudios

Lugar	Valor del agua USD/ $m^3$	Referencia	Ecosistema evaluado	Método de valoración económica
Mariño, Abancay	0,14	Moreano, 2020	Pajonal, bofedal y bosque nativo	Costo oportunidad
Río Blanco, Ecuador	0,08	Ariolfo, 2018	Bosque y suelo	Costo oportunidad
Tempisque, Costa Rica	0,0056	Barrantes, 2010	Bosque	Costo oportunidad
Pueblo Nuevo- Durango, México 0.097	0,097	Silva-Flores et al., 2010	Bosque	Cambio de productividad
Acelhuate, El Salvador	0,008	Calles, 2014	Bosque	Costo oportunidad

## CONCLUSIONES

Para el caso de la biodiversidad funcional, representada en tres ecosistemas, tales como pastizal/pajonal, bofedal y bosque nativo, se encontró que el valor del agua es de  $S/.0,09/m^3$ ,  $S/.0,43/m^3$  y  $S/.0,00/m^3$  respectivamente; estos ecosistemas albergan una gran diversidad de especies vegetales, como algas, musgos y costras biológicas (biocrusts),

que en condiciones de conservación permiten una mayor captación e interceptación de agua, que disminuye la escorrentía e incrementa los procesos de infiltración y percolación del agua hacia el subsuelo, generando una mayor oferta hídrica en las fuentes de agua como los manantiales ubicados en la cuenca media y baja.

Económicamente los ecosistemas de pastizales y bofedales generan mayor valor de captación de agua en comparación con el ecosistema de bosque nativo; esto puede atribuirse a que las especies de bosque nativo como son las *Polylepis sp.*, presentan un ritmo de crecimiento muy lento por lo que sus beneficios

ecosistémicos hídricos tienen una respuesta después de un periodo prolongado a su instalación. Se sugiere evaluar con mayor detalle la biodiversidad funcional, aplicando otras metodologías de valoración económica.

## AGRADECIMIENTOS

Al Fondo Nacional de Desarrollo Científico Tecnológico y de Innovación Tecnológica – FONDECYT,

del Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez, D. (1995). Impacto hidrológico de la reforestación en las regiones tropicales. ISA, Dirección de ecología y de recursos naturales. Medellín, Colombia.
- Ariolfo, G., Campos, E., & Heredia, A. (2018). Valoración económica del servicio de producción hídrica de la microcuenca del río Blanco. *SATHIRI*, 13(2), 168-177.
- Avella, A., Rangel-Churio, O., & Solano, C. (2017). Conservación, manejo y restauración de los bosques de robles (*Quercus humboldtii* Bonpl.) en Colombia: Estudio de caso en el corredor de Conservación Guantiva - La Rusia - Iguaque (departamentos de Santander y Boyacá, Colombia). In: Rangel-Churio O, editor. Colombia Diversidad Biótica XV. Los bosques de robles (Fagaceae) en Colombia. Universidad Nacional de Colombia, pp 261-286.
- Bartkowski, B., Lienhoop, N., & Hansjürgens, B. (2015). Capturing the complexity of biodiversity: A critical review of economic valuation studies of biological diversity. *Ecological Economics*, 113, 1-14.
- Barrantes, G. (2010). Evaluación del servicio ambiental hídrico en la cuenca del río Tempisque (Costa Rica) y su aplicación al ajuste de tarifas. Instituto de Políticas para la Sostenibilidad.
- Biniam, B. A., Philip, J. P., Marco, N., Neil, D. B., Andrew, B., R. Kerry, T., & Marije S. (2018). Integrated modelling for economic valuation of the role of forests and woodlands in drinking water provision to two African cities. *Ecosystem Services*, 32, 50-61.
- Brauman, K. A. (2015). *Freshwater*. In: Potschin, M., Haines-Young, R., Fish, R., Turner, R.K. (Eds.), *Handbook of Ecosystem Services*. Routledge, pp. 374-382.
- Calles, J. R. (2014). El valor del agua que producen los bosques y cafetales en la subcuenca del río Acelhuate. *Revista Entorno*, 56, 58-68.
- Campbell, E.T., & Tilley, D.R. (2014). Valuing ecosystem services from Maryland forests using environmental accounting. *Ecosyst. Serv.* 7, 141-151.
- Cuellar, I. (2017). Fitocolonización en la zona Periglacial del Glaciar Conejeras, en el Volcán Nevado de Santa Isabel—Proyecto Piloto. Bogotá, Colombia: IDEAM [Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales].
- Cuesta, F., Muriel, P., & Llambi, L.D. (2017). Latitudinal and altitudinal patterns of plant community diversity on mountain summits across the tropical Andes. *Ecography*, 40(12), 1381-1394.
- Chapin, F. S., Matson, P. A., & Mooney, H. A. (2002). *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. New York: Springer-Verlag.
- Chamizo, S., Cantón, Y., & Rodríguez-Caballero, E. (2015). Biocrusts positively affect the soil water balance in semiarid ecosystems. *Journal of Ecohydrology*, 9(7), 1208-1221.
- Davidsen, C., Liu, S., & Mo, X. (2015). Hydroeconomic optimization of reservoir management under downstream water quality constraints. *Journal of Hydrology*, 529, 1679-1689.
- Daniels, S., Bellmore, J. R., Benjamin, J. R., & Witters, N. (2018). Quantification of the Indirect Use Value of Functional Group Diversity Based on the Ecological Role of Species in the Ecosystem. *Ecological Economics*, 153, 181-194.
- Debb, A. (1992). Estimación de cambios en la respuesta hidrológica. Deeb Sossa S. En C. Ingenieros Consultores, DNP-PAFC-BID. Colombia.
- Denevan, W. M. (2001). *Cultivated landscapes of native Amazonia and the Andes: Triumph over the soil*. Oxford: Oxford University Press.
- Díaz, S., Fargione, J., Chapin, F.S., & Tilman, D. (2006). Biodiversity loss threatens human well-being. *PLoS Biology*, 4, 1300-1305.
- Duque, A., Stevenson, P. R., & Fealey, K. J. (2015). Thermophilization of adult and juvenile tree communities in the northern tropical Andes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(34), 10744-10749.
- Foley, J. A., R. De Fries, G. P., & Asner, C. (2005). Global consequences of land use. *Science*, 309, 570-574.
- Goldman-Benner, R. L., Benitez, S., & Calvache, A. (2013). Water Funds: A New Ecosystem Service and Biodiversity Conservation Strategy. *Reference Module in Life Sciences*, 352-356.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática - INEI. (2018). Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas.
- Ichii, K., Molnár, Z., & Obura, D. (2019). Chapter 2.2. Status and trends in nature. In: IPBES [Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services], editor. *The Global Assessment of Biodiversity and Ecosystem Services*. Paris, France: IPBES.
- Kragt, M. E., Pannell, D. J., & Stott, A. W. (2016). Improving interdisciplinary collaboration in bio-economic modelling for agricultural systems. *Agricultural Systems*, 143, 217-224.
- Lusardi, J., Sunderland, T.J., Crowe, A. (2020). Can process-based modelling and economic valuation of ecosystem services inform land management policy at a catchment scale?. *Land Use Policy*, 96, 104636.
- Maes, J., Egoh, B., & Willemsen, L. (2012). Mapping ecosystem services for policy support and decision making in the European Union. *Ecosyst. Serv.*, 1(1), 31-39.
- Momblanch, A., Connor, J. D., & Crossman, N. D. (2016). Using ecosystem services to represent the environment in hydro-economic models. *Journal of Hydrology*, 538, 293-303.
- Kay, C. (2009). Development strategies and rural development: exploring synergies, eradicating poverty. *Journal of Peasant Studies*, 36(1), 103-137.
- PRODERN, MINAM. (2018). Mecanismos de Retribución por Servicios Ecosistémicos. Sistematización y Lecciones Aprendidas.
- Quintero, E., Benavides, A. M., & Moreno, N. (2017). Bosques Andinos, estado actual y retos para su conservación en Antioquia. Medellín, Colombia: COSUDE [Fundación Jardín Botánico de Medellín Joaquín Antonio Uribe-Programa Bosques Andinos].
- Rodríguez-Caballero, E. J., Castro, A., & Chamizo, S. (2017). Ecosystem services provided by biocrusts: From ecosystem functions to social values. *Journal of Arid Environments*, 159, 45-53.
- Schaafsma, M., Ferrini, S., Harwood, A. R., & Bateman, I.J. (2015). The first United Kingdom's national ecosystem assessment and beyond. In: Martin-Ortega, J., Ferrier, R.C., Gordon, I.J., Khan, S. (Eds.), *Water Ecosystem Services: A Global Perspective*. Cambridge University Press, pp. 73-81.
- Silva-Flores, R., Pérez-Verdín, G., & Nívar-Cháidez, J. (2010). Valoración económica de los servicios ambientales hidrológicos en El Salto, Pueblo Nuevo, Durango. *Madera y Bosques*, 16(1), 31-49.
- Taher, K., M., Albiac, J., & Dinar, A. (2016). Improving the Performance of Water Policies: Evidence from Drought in Spain.
- Terrado, M., Acuña, V., Ennaanay, D., Tallis, H., & Sabater, S. (2014). Impact of climate extremes on hydrological ecosystem services in a heavily humanized Mediterranean basin. *Ecol. Ind.*, 37, 199-209.
- Van der Ploeg, S., & De Groot, R. (2010). The TEEB Valuation Database—A Searchable Database of 1310 Estimates of Monetary Values of Ecosystem Services. Foundation for Sustainable Development, Wageningen, The Netherlands.
- Zhang, W., Dulloo, E., Kennedy, G., Bailey, A., Sandhu, H., & Nkonya, E. (2019). *Biodiversity and ecosystem services. In: Sustainable food and agriculture: An integrated approach*. (Campanhola, C. et al. (eds.)) Academic Press. p. 137-152.