

Análisis de relación  
beneficio-costos de inversiones  
en la naturaleza en la Cuenca  
del Río Grande, Colombia

# Caso de negocio



Nature for Water  
Local solutions. Global impact.



# Caso de negocio

---

Análisis de relación beneficio-costos de inversiones en la naturaleza en la Cuenca del Río Grande, Colombia

## Autores

**Débora Miranda**  
Debora.miranda@tnc.org

**Miguel Cañón**  
Miguel.canon@tnc.org

**Maria Camila Moreno**  
Maria.moreno@tnc.org

**Diana Madrigal**  
Diana.madrigal@tnc.org

En colaboración con:



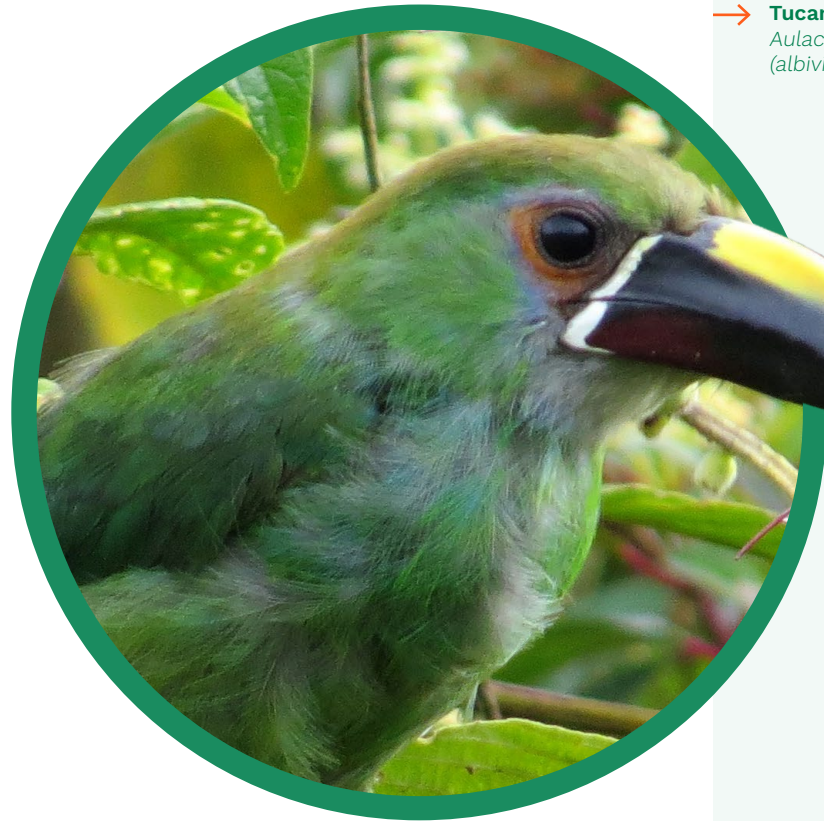
## Diseño y diagramación

**Punto aparte**  
Editores

**Corrección de estilo**  
Jhon Güechá







→ **Tucaneta Verde**  
*Aulacorhynchus Prasinus*  
 (albivitta)

# Tabla de contenido

Audiencias clave	6
Resumen ejecutivo	7
Siglas	11
Introducción	12
Contexto	17
Marco metodológico	20
<b>FASE 1. Metodología de análisis biofísico</b>	<b>21</b>
• Paso 1.1 Recopilación de información	21
• Paso 1.2 y 1.3 Desarrollo y modelación de escenario tendencial o Business as Usual	22
• Paso 1.4 Modelación SIGA-CAL de escenarios SbN	24
• Paso 1.5 Estimación de beneficios adicionales	31

<b>FASE 2. Análisis de relación beneficio-costos</b>	<b>34</b>
• Paso 2.1 Estimación de costos de las inversiones en SbN	35
• Paso 2.2 Estimación de costos del programa	39
• Paso 2.3 Monetización de beneficios	40
• Paso 2.4 Monetización del costo social del carbono	46
• Paso 2.5 Tasa de descuento	49
Factores que influyen en la relación beneficio-costos (RBC)	54
Cobeneficios	55
Biodiversidad	56
Salud	60
Productividad agrícola	62
Adaptación ante eventos climáticos	64

<b>Conclusiones</b>	<b>66</b>
<b>Referencias</b>	<b>68</b>
<b>Apéndices</b>	<b>70</b>
• Apéndice A. Memoria de cálculo	
• Apéndice B. Análisis biofísico SbN - CuencaVerde	
• Apéndice C. Monetización de los beneficios para los acueductos veredales	
• Apéndice D. Manejo de sedimentos del embalse Riogrande	
• Apéndice E. Monetización del costo social del carbono	
• Apéndice F. Beneficio adicional - Bonos de carbono	

# Audiencias clave

Este caso de negocio ilustra cómo la inversión en Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) no solo aborda problemas de seguridad hídrica, sino que también genera una serie de valiosos cobeneficios. El análisis se basa en la experiencia desarrollada por el Fondo de Agua CuencaVerde en el Valle de Aburrá, Norte y Oriente antioqueño, y muestra posibles escenarios

de inversiones y sus beneficios. El caso de negocio fue diseñado para ser de interés para diversas audiencias, incluyendo la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA), los acueductos veredales de la cuenca, posibles inversionistas o socios de CuencaVerde y la población en general que se beneficiaría de estas inversiones.

# Resumen ejecutivo

La cuenca del río Grande enfrenta retos significativos en términos de seguridad hídrica, principalmente debido a la calidad del agua afectada por el uso del suelo (ganadería y agricultura) y la falta de tratamiento de aguas. Además, la cuenca presenta áreas con alta susceptibilidad a inundaciones, asociadas a procesos erosivos y deslizamientos, especialmente en los municipios de San Pedro de los Milagros, Entre Ríos y Belmira.

Desde 2015, CuencaVerde, el Fondo de Agua del Valle de Aburrá, Norte y Oriente antioqueño de Colombia, ha trabajado como articulador de actores, canalizando voluntades y generando sinergias para alcanzar la seguridad hídrica y fortalecer la gobernanza del agua. Asimismo, ha servido como un instrumento financiero sostenible para la ejecución de proyectos colectivos que contribuyen a la gestión del conocimiento, la protección de ecosistemas y cuencas abastecedoras, apoyando la adaptación y mitigación del cambio climático y sensibilizando a los habitantes.

Con el respaldo de socios estratégicos como Empresas Públicas de Medellín (EPM), CuencaVerde ha implementado con éxito un portafolio de Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN), consolidándose como un catalizador de colaboración entre el sector público, privado y la comunidad local. El portafolio de CuencaVerde comprende seis SbN, que

incluyen: mejores prácticas ganaderas, restauración activa en núcleos, restauración pasiva, mejores prácticas agrícolas, restauración activa de enriquecimiento y conservación.

En el marco de la misión de CuencaVerde, este estudio busca evaluar los beneficios que se pueden generar en la cuenca del río Grande a partir de la implementación del portafolio de SbN. Específicamente, se consideran beneficios para actores como EPM, los acueductos veredales como Empresas Públicas de Belmira S.A. E.S.P., Acueducto de San Francisco S.A. E.S.P., Acueductos y Alcantarillados Sostenibles S.A. E.S.P., y la población en general. Se espera que los proveedores aprovechen la oportunidad que brinda la Comisión Reguladora de Agua Potable y Saneamiento (CRA) mediante la Resolución CRA 907 de 2019, la cual permite a los prestadores del servicio público domiciliario de acueducto incluir en la tarifa inversiones ambientales para proteger las cuencas y fuentes de agua.

Sin embargo, es importante destacar que, hasta la fecha, dicha resolución solo habilita inversiones ambientales adicionales asociadas principalmente a los servicios hidrológicos de regulación y/o rendimiento hídrico, limitando el potencial de inversiones adicionales para mejorar la calidad del agua. Esto es particularmente relevante en cuencas como la del río Grande, donde los principales



## Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA)

Este caso de negocio demuestra los múltiples beneficios de las inversiones ambientales. La Resolución CRA 907 actúa como un habilitador para que, de manera colectiva, se logren implementar estas inversiones.



## Acueductos veredales de la cuenca

El caso de negocio muestra a los diferentes acueductos veredales los beneficios y cómo estos se traducen en una reducción de costos en sus operaciones.



## Inversionistas

El caso de negocio demuestra que, a medida que aumenta la escala de inversión, también lo hacen los beneficios de las Soluciones basadas en la Naturaleza en la cuenca. Por lo tanto, se anticipa que este caso de negocio atraerá a inversionistas, quienes comprenderán que, para maximizar los beneficios, se necesita un apoyo colectivo de varios inversionistas.



## Población general

El caso el negocio muestra los beneficios y cobeneficios que puede percibir la población general con la implementación de las Soluciones basadas en la Naturaleza, entre ellos, la reducción del costo social del carbono y la mejora en la calidad del agua.



usos del suelo son la agricultura y la ganadería, los cuales, si no se gestionan adecuadamente, generarán grandes impactos en la cuenca y sus fuentes de agua.

Además, entendiendo que los beneficios de las SbN se perciben y aumentan conforme crece la inversión, y que al mejorar la calidad del agua y de los ecosistemas de la cuenca se benefician directa o indirectamente todos sus habitantes, se espera generar interés entre inversionistas adicionales. Esto permitiría implementar un portafolio a gran escala.

Para lograr estos objetivos, se llevó a cabo un análisis biofísico y, con sus resultados, se desarrolló un análisis de relación beneficio-costos sobre la implementación del portafolio de SbN de CuencaVerde. Las variables hidrológicas consideradas en el análisis biofísico fueron sólidos suspendidos totales, nitrógeno orgánico, fósforo orgánico, *Escherichia coli* (*E. coli*) y flujo base.

El análisis biofísico se desarrolló mediante el modelo SIGA-CAL. A través de este modelo se crearon diferentes escenarios de inversión en SbN, permitiendo comparar los resultados en términos de hidrología, sedimentos y variables de calidad del agua. Para evaluar los resultados o beneficios de la implementación del portafolio de SbN, se generó un escenario tendencial a treinta años, considerando los usos y transformaciones históricas del suelo de la cuenca del río Grande y proyectando la transformación futura esperada sin inversiones en SbN. Posteriormente, se comparó con cinco escenarios de implementación de SbN, correspondientes a inversiones de USD 10 millones (escenario 1), USD 50 millones (escenario 2),

USD 70 millones (escenario 3), USD 90 millones (escenario 4) y USD 110 millones (escenario 5). Estos escenarios incluyen los costos de implementación, monitoreo, mantenimiento y costos administrativos, esenciales para la sostenibilidad de las SbN.

Entre los principales hallazgos de la implementación de SbN se destacan las reducciones en la carga de sedimentos, incluyendo los sedimentos suspendidos, la erosión total en el cauce y la ladera y el transporte. Estos resultados se obtuvieron en promedio para la cuenca, con reducciones de sedimentos que van desde un 2,9 % en el escenario 1 hasta más del 50 % en el escenario 4. Para el nitrógeno y fósforo, se reporta una disminución aproximada del 20 % y 10 %, respectivamente, y una tendencia decreciente en la presencia de *E. coli*, con una disminución de hasta el 20 % en el escenario 5.

El análisis de relación beneficio-costos (RBC) se compone del cociente entre la suma de todos los beneficios divididos y la suma de todos los costos. Los costos incluyen los gastos de gestión del programa y las intervenciones de SbN en los cinco escenarios de implementación. Los beneficios contemplan, principalmente, los siguientes aspectos:

- **EPM:** enfocados en el aumento de la vida útil del embalse Rio-grande II mediante la gestión de los sedimentos. Los resultados muestran que la implementación de SbN puede prolongar la vida útil del embalse entre 3 y 12 años, dependiendo del escenario de intervención.
- **Acueductos veredales:** enfocados en costos evitados en el tratamiento de agua potable. Estos

resultados varían según la inversión en SbN y la ubicación de los acueductos en relación con la implementación de SbN. Por ejemplo, el acueducto de Acueductos y Alcantarillados Sostenibles (AASA) del municipio de San Pedro de los Milagros podría percibir una reducción de hasta el 23 % de los costos anuales de operación de la planta de tratamiento de agua a partir del año 11 con el escenario 2. En contraste, un acueducto como el de Empresas Públicas de Belmira (Empubel) podría tener ahorros menores al 5 % a partir del año 12 en el mismo escenario de inversión.

- **Población general:** beneficios relacionados con el costo social del carbono, estimando el CO<sub>2</sub> equivalente no liberado a la atmósfera

como resultado de los diferentes escenarios de implementación en SbN, especialmente en conservación. Los resultados muestran que, en el escenario 1, comienzan a evidenciarse cambios, pero a partir de inversiones como las del escenario 2 se observan incrementos significativos de CO<sub>2</sub> equivalente a lo largo de la cuenca, alcanzando un promedio anual de 75.070 tCO<sub>2</sub>eq.

Como resultado general, el análisis de RBC reveló que, en todos los escenarios, el programa CuencaVerde presenta una RBC atractiva (>1, indicando que los beneficios superan los costos) en un horizonte de análisis de 30 años, fluctuando entre 1,4 y 3,6 según el escenario de inversión, como se muestra en la figura 1.

**Figura 1.** Relación beneficio-costos para los escenarios de inversión de Soluciones basadas en la Naturaleza, en la cuenca del río Grande, representada en valor presente neto<sup>1</sup>



Fuente: N4W (2024).

1. El valor presente neto fue calculado utilizando una tasa de descuento del 3,5 % recomendada por el Departamento Nacional de Planeación de Colombia para proyectos con un horizonte mayor a 30 años.



→ Fuente: CuencaVerde.

Estos hallazgos respaldan la viabilidad de invertir en la implementación de SbN, demostrando un valor económico positivo y contribuyendo a la mitigación de los efectos adversos del cambio climático en la región. Además, evidencian el rol fundamental de un Fondo de Agua como CuencaVerde como articulador y promotor de actores para la protección de las cuencas abastecedoras y la adaptación y mitigación del cambio climático.

Es fundamental destacar que el análisis reveló cómo el impacto de las SbN en una cuenca está estrechamente ligado a la escala de las intervenciones. Para lograr una implementación a gran escala de

estas inversiones, es crucial adoptar una perspectiva integral de la cuenca, considerándola como una unidad de planificación. Esto implica reconocer la interconexión de los sistemas hídricos y comprender que las inversiones en la naturaleza benefician a la cuenca en su conjunto, promoviendo la seguridad hídrica y el desarrollo de todas las actividades en su territorio. Por tanto, una visión holística de la cuenca, acciones colectivas como las promovidas por CuencaVerde y herramientas como las tarifas para la protección de las cuencas y fuentes de agua son elementos clave para impulsar estas inversiones esenciales, permitiendo que la naturaleza y la población prosperen.

## Siglas

AASA	Acueductos y Alcantarillados Sostenibles S.A.
ACC	Agenda Compartida de Conservación
Acuasfran	Acueducto veredal de San Francisco
BaU	Escenario <i>Business as Usual</i> o escenario tendencial
CRA	Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico
CSC	Costo social del carbono
DMI	Distrito de manejo integrado
<i>E. coli</i>	<i>Escherichia coli</i>
EDA	Enfermedad diarreica aguda
Empubel	Empresas Públicas de Belmira
EPM	Empresas Públicas de Medellín
GEI	Gases de efecto invernadero
Ha	Hectáreas
N4W	Nature for Water Facility
N	Nitrógeno orgánico
O&M	Operación y mantenimiento
P	Fósforo orgánico
PBANMA	Sistema de Páramos y Bosques Altoandinos del Noroccidente Medio Antioqueño
PIB	Producto interno bruto
POMCA	Plan de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas
Q	Caudal
SbN	Soluciones basadas en la Naturaleza
SST	Sólidos suspendidos totales
RBC	Relación beneficio-costos
TNC	The Nature Conservancy
VPN	Valor presente neto
WEDA	Western Dredging Association





→ **Leopardo trigrinus**  
(tigrillo lanudo)

# Introducción

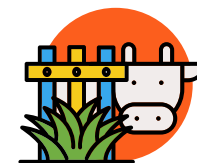
La seguridad hídrica es la capacidad de una población para salvaguardar el acceso sostenible a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable, garantizando la sostenibilidad de los medios de vida, el bienestar humano y el desarrollo socioeconómico. También implica la protección contra la contaminación del agua y los desastres relacionados, así como la conservación de los ecosistemas en un entorno de paz y estabilidad política. En este contexto, la seguridad hídrica busca asegurar el acceso a cantidades suficientes de agua para satisfacer diversos usos, preservar la calidad de los recursos hídricos y considerar adecuadamente el cambio climático (Miralles-Wilhelm et al., 2022).

Los Fondos de Agua son mecanismos financieros y de gobernanza que articulan los sectores público, privado y la sociedad civil, con el fin de contribuir a la seguridad hídrica a través de Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) y el manejo sostenible de la cuenca. Las SbN son acciones para proteger, gestionar de forma sostenible y restaurar los ecosistemas naturales o modificados. Estas soluciones abordan los retos de la sociedad (como el cambio climático, la seguridad alimentaria y del agua, o los desastres naturales) de manera eficaz y adaptativa, proporcionando al mismo tiempo bienestar humano y la biodiversidad (Cohen-Shacham et al., 2016).

CuencaVerde es el Fondo de Agua del Valle de Aburrá, Norte y Oriente antioqueño. Su propósito es promover la gobernanza del agua, la seguridad hídrica y la adaptación al cambio climático, a tra-

vés de la articulación del sector público, privado y la comunidad, para la protección y mejoramiento de las cuencas abastecedoras. El fondo cuenta con un portafolio de SbN que incluye:

**Tabla 1. Portafolio de intervención de SbN - CuencaVerde**



### Mejores prácticas ganaderas

Introducción activa de plantas arbustivas y arbóreas que mejoran los suelos y sirven como forraje para el ganado, aumentando así la productividad. Esto se asocia con la mejora de suelos compactados y la calidad de los pastos.



### Restauración activa - núcleos

Hay muchísimas técnicas para llevar a cabo una restauración activa, pero un factor común es la introducción activa de plantas nativas diversas, así como el mejoramiento de los suelos y la introducción de otros elementos que agilizan el proceso como la hojarasca. Dado el esfuerzo que implica, esta actividad es, por lo general, bastante costosa. La restauración activa por núcleos consiste en instalar núcleos de plantas nativas que atraen dispersores y facilitan el proceso de regeneración natural. Sólo debe implementarse en zonas adyacentes a áreas naturales. En este esquema de restauración por núcleos se plantan aproximadamente 800 árboles por hectárea.



### Restauración pasiva

Combinación de acciones que facilitan la regeneración natural de los sistemas, retirando la fuente de degradación de la cobertura vegetal. La estrategia más común es el cercamiento físico (por ejemplo, cercado con púas o eléctrico).



### Mejores prácticas agrícolas

Introducción activa de plantas productivas, generalmente arbustivas o arbóreas, frecuentemente combinadas con otras especies (como café con sombrío o cacao con plátano). Además, se utilizan arreglos adicionales como cercas vivas, que contribuyen a una mayor productividad.



### Restauración activa - enriquecimiento

La restauración activa por enriquecimiento consiste en introducir plantas nativas en las zonas más degradadas de un área en la que ya existen relictos de vegetación nativa. En este esquema de restauración por núcleos se plantan aproximadamente 390 árboles por hectárea. Si se tiene como referencia que un esquema de restauración denso incorpora 1500 plantas por hectárea, se podría asumir que esas 390 plantas corresponden aproximadamente a un 26% de cobertura inmediata al momento de la siembra.



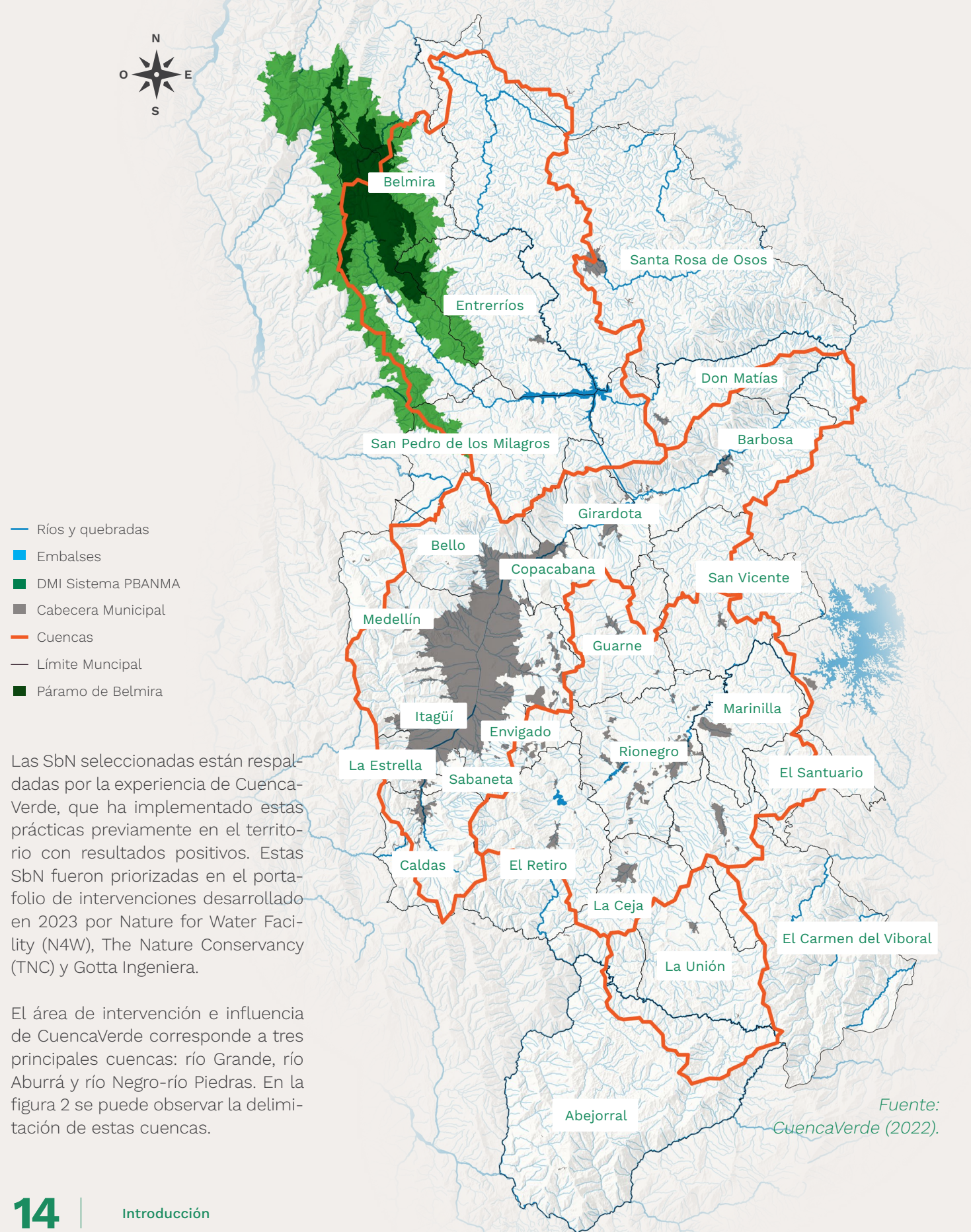
### Conservación

Acciones que buscan conservar la cobertura actual, tales como la firma de acuerdos de conservación, el pago a guardabosques y el cercamiento de estas áreas.

Fuente: CuencaVerde (2024).



**Figura 2.** Área de influencia del Fondo de Agua CuencaVerde



Las SbN seleccionadas están respaldadas por la experiencia de CuencaVerde, que ha implementado estas prácticas previamente en el territorio con resultados positivos. Estas SbN fueron priorizadas en el portafolio de intervenciones desarrollado en 2023 por Nature for Water Facility (N4W), The Nature Conservancy (TNC) y Gotta Ingeniera.

El área de intervención e influencia de CuencaVerde corresponde a tres principales cuencas: río Grande, río Aburrá y río Negro-río Piedras. En la figura 2 se puede observar la delimitación de estas cuencas.

Fuente: CuencaVerde (2022).

Con el objetivo de apoyar a los Fondos de Agua y programas de inversión de cuencas, y fortalecer el rol clave que desempeñan, TNC lanzó la iniciativa de N4W. En 2023, CuencaVerde solicitó apoyo técnico de N4W para desarrollar el presente caso de negocio, con el fin de determinar la relación beneficio-costos que se pueden obtener a través de la implementación del portafolio de SbN y, de esta manera, promover una mayor inversión en la cuenca.

El objetivo principal de este estudio es desarrollar un caso de negocio evaluando la relación beneficio-costos que será percibida en la cuenca del río Grande por diferentes actores, entre ellos: Empresas Públicas de Medellín (EPM), los acueductos veredales como Empresas Públicas

de Belmira S.A. E.S.P., Acueducto de San Francisco S.A. E.S.P., Acueductos y Alcantarillados Sostenibles S.A. E.S.P., y la población en general mediante la implementación de diferentes escenarios del portafolio de inversión de SbN.

Además, al demostrar una relación beneficio-costos favorable, se espera que los proveedores de agua de la cuenca se vean motivados a aplicar las oportunidades de inversiones adicionales para la conservación de cuencas, cargadas a la tarifa establecida en la Resolución CRA 907 del 2019. Este mecanismo excepcional e innovador permite que, de forma conjunta, estas organizaciones apoyen el financiamiento de las SbN a escala de cuenca. La resolución establece que:

**“La persona prestadora del servicio público domiciliario de acueducto puede incluir en la tarifa inversiones ambientales con la finalidad de proteger las cuencas y fuentes de agua, las cuales pueden ser de carácter: i) obligatorio, cuando están incluidas en los planes, concesiones, permisos, tasas o licencias ambientales o por efecto de mandatos judiciales, u ii) optativas y adicionales a las establecidas en las normas ambientales”.** (CRA, 2019).





→ Fuente: CuencaVerde.

Actualmente, la Resolución CRA 907 reconoce seis tipos de inversiones ambientales que se pueden financiar mediante este mecanismo: a) compra y aislamiento de predios, b) proyectos de recarga acuífera, c) restauración, d) protección de cuencas y fuentes abastecedoras de agua, e) monitoreo del recurso hídrico, y f) pagos por servicios ambientales de regulación y calidad hídrica. Dichas intervenciones se alinean con el portafolio de CuencaVerde.

Cabe resaltar que, a pesar de mencionarse *calidad hídrica*, se ve limitada la identificación de potenciales inversiones ambientales para abordar problemas de calidad del agua. Esto se debe a la falta de claridad en la misma resolución, como se menciona en el artículo 31H, párrafo 3: “Las inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua deben estar asociadas a los servicios hidrológicos de regulación del ciclo hidrológico y/o rendimiento hídrico”. Además, no se especifican criterios para su evaluación y posibles beneficios.

Asimismo, se reconocen múltiples cobeneficios para la población de la cuenca por la implementación de SbN, que, aunque no se monetizan en este caso de negocio, son claves para la población, la economía y el medio ambiente, y por ende se considera esencial mencionarlos. Entre estos cobeneficios se destacan los posibles costos evitados por una disminución de enfermedades diarreicas asociadas a una reducción de *E. coli* en el agua, el aumento en la productividad de la industria lechera asociado a la implementación de buenas prácticas ganaderas, la mejora en la calidad del hábitat y, consecuentemente, un aumento en la biodiversidad en la cuenca. Además, se consideró que un aumento en la cobertura boscosa influye y promueve una adaptación al cambio climático, directamente relacionada con la reducción de eventos como inundaciones y temperaturas extremas locales, lo que puede implicar un aumento en la productividad y bienestar de la población.

# Contexto

## Caracterización de la cuenca

El caso de negocio se enmarca en una de las áreas de intervención de CuencaVerde, específicamente en la cuenca de los ríos Grande y Chico (más conocida como la cuenca del río Grande), ubicada en la subregión del Norte de Antioquia, con una extensión de 106.244 ha. Esta área incluye los municipios de Belmira, Don Matías, Entreríos, San Pedro de los Milagros, Santa Rosa de Osos y una pequeña porción de Yarumal, con una población estimada de

68.066 habitantes. La cuenca está compuesta por una extensa red de drenaje que abarca más de 18 subcuencas, las cuales alimentan a los embalses Riogrande I y Riogrande II (Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia [Corantioquia], 2015).

Según el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca (POMCA) de 2015, la cobertura del suelo se distribuye principalmente en cuatro categorías:



como se observa en la figura 3.

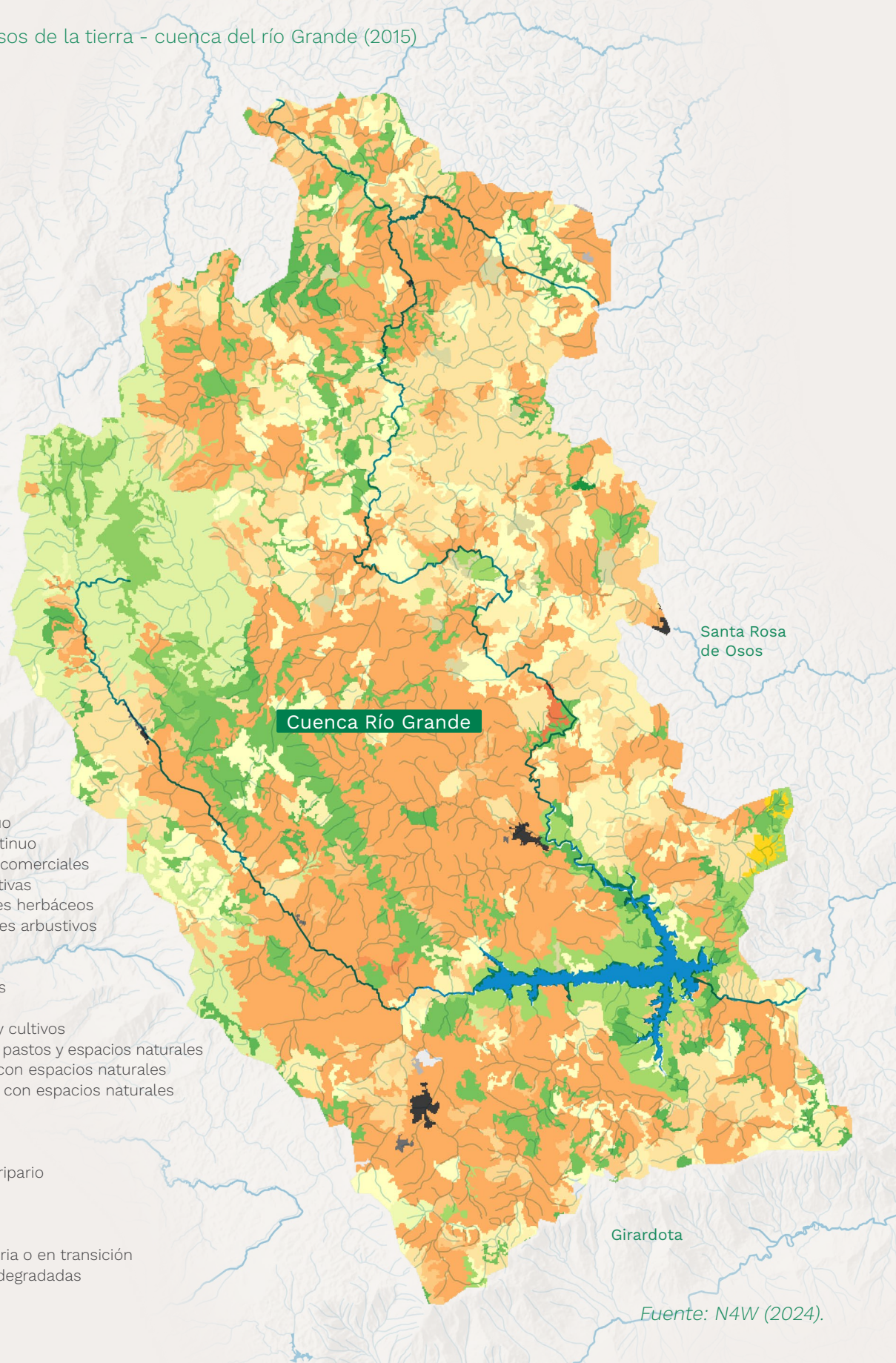
**Estos datos coinciden con las actividades económicas predominantes en la cuenca, que son la ganadería de leche y las actividades agrícolas.**



Figura 3. Cobertura y usos de la tierra - cuenca del río Grande (2015)



- 1.1.1. Tejido urbano continuo
- 1.1.2. Tejido urbano discontinuo
- 1.2.1. Zonas industriales o comerciales
- 1.4.2. Instalaciones recreativas
- 2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos
- 2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos
- 2.3.1. Pastos limpios
- 2.3.2. Pastos arbolados
- 2.3.3. Pastos enmalezados
- 2.4.1. Mosaico de cultivos
- 2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos
- 2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales
- 2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales
- 2.4.5. Mosaico de cultivos con espacios naturales
- 3.1.1. Bosque denso
- 3.1.2. Bosque abierto
- 3.1.3. Bosque fragmentado
- 3.1.4. Bosque de galería y ripario
- 3.1.5. Bosque pantano
- 3.2.1. Herbazales
- 3.2.2. Arbustales
- 3.2.3. Vegetación secundaria o en transición
- 3.3.3. Tierras desnudas y degradadas
- 3.3.4. Zonas quemadas
- 4.1.1. Zonas pantanosas



La temperatura media en la cuenca es de 15° C, con una alta precipitación anual que oscila entre 2.000 y 2.500 mm. Por tanto, el estrés hídrico por escasez de agua no es la principal preocupación de seguridad hídrica de la cuenca. Además, los informes de supervisión de cuencas realizados por CuencaVerde en 2022, en consonancia con el POMCA, señalan que la cuenca está afectada principal-

mente por la contaminación de las aguas residuales de algunas cabeceras municipales, veredas y corregimientos, y por las descargas contaminantes derivadas del uso intensivo de agroquímicos y plaguicidas y el aumento en procesos de sedimentación por pérdida de coberturas naturales. Por tanto, se puede concluir que el principal problema de seguridad hídrica en la cuenca es **la calidad del agua**.

→ Fuente: CuencaVerde.



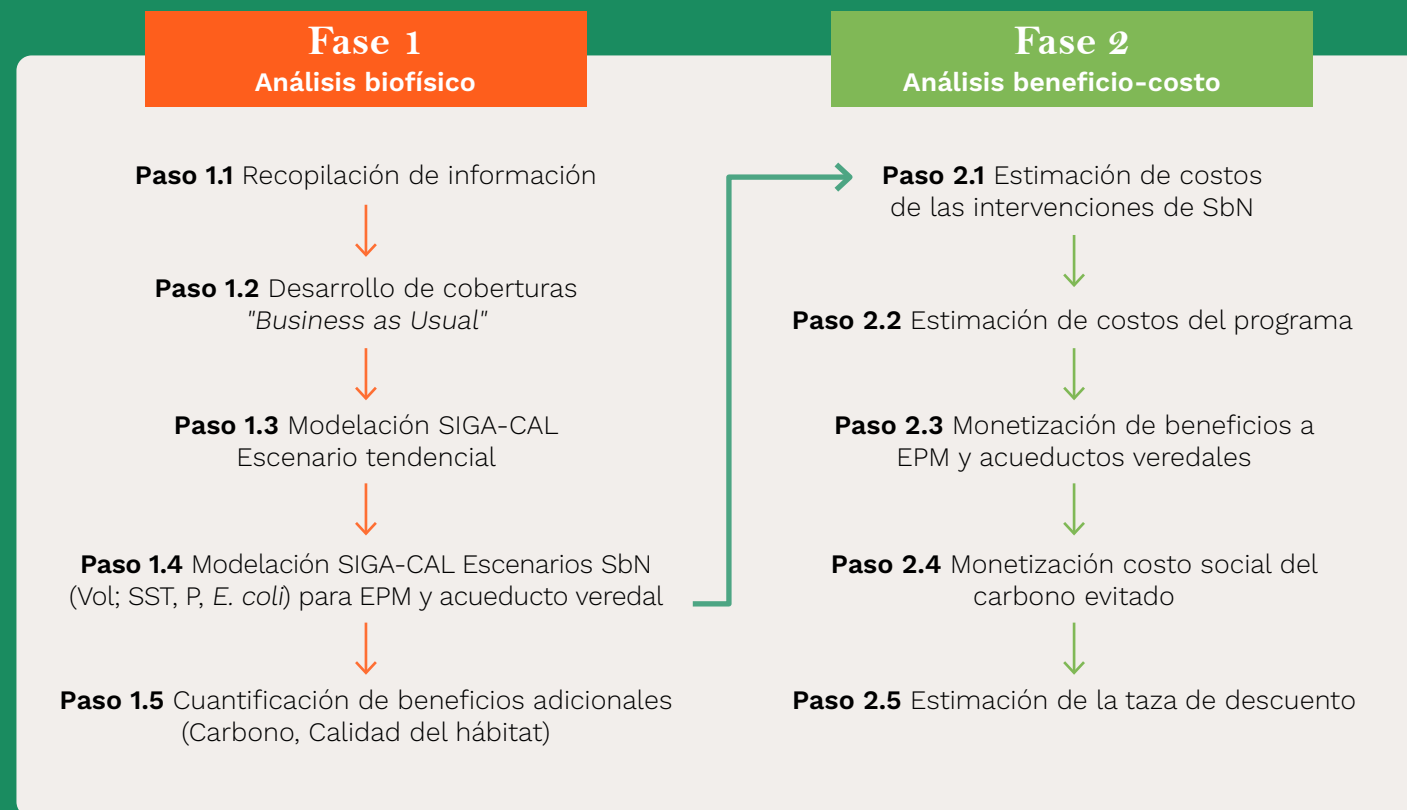


# Marco metodológico

La metodología empleada se dividió en dos fases principales. En la fase 1, se llevó a cabo un exhaustivo análisis biofísico que incluyó la modelación hidrosedimentológica mediante el modelo SIGA-CAL. Además, se realizaron cálculos para determinar beneficios adicionales, como el carbono secuestrado y la calidad del hábitat, en escenarios de implementación de SbN y un escenario tendencial o *Business as*

*Usual* (BaU). Por otro lado, la fase 2 se enfocó en establecer una relación cuantitativa entre los servicios ecosistémicos obtenidos como resultado de los diferentes escenarios de inversión en SbN y los costos asociados a la implementación de dichas inversiones. La combinación de estos dos aspectos permitió determinar la relación beneficio-costo (RBC), como se resume en la figura 4.

Figura 4. Metodología y pasos



Fuente: N4W (2024).

Canelo  
(*Pyrrhomyias  
cinnamomeus*)



## Fase 1

### Metodología de análisis biofísico

#### Paso 1.1 Recopilación de información

Esta actividad se centró en la recolección de datos relacionados con diversas variables ambientales, incluyendo series de datos de precipitaciones, caudales líquidos y sólidos, temperatura y brillo solar en la cuenca del río Grande. Además se recopilaron mapas básicos y temáticos que abarcan divisiones políticas, modelos digitales de elevación, redes de transporte y mapas topográficos, geomorfológicos, de cobertura vegetal, de suelos y geológicos.

Adicionalmente se recopilaron estudios como el portafolio de SbN de CuencaVerde, información sobre carbono y dinámicas ambientales para el desarrollo de modelos de calidad de hábitat. También se utilizó el modelo SIGA-CAL, desarrolla-

do y calibrado para las cuencas de los ríos Grande, Arma y Negro, en el estudio previamente realizado por N4W (2023), que permitirá generar diferentes escenarios con resultados de hidrología, sedimentos y algunas variables de calidad de agua.

Para más detalles acerca de las bases matemáticas del modelo SIGA-CAL y el proceso de calibración, se recomienda consultar el artículo "Planning and Evaluating Nature-Based Solutions for Watershed Investment Programs with a SMART Perspective Using a Distributed Modeling Tool" (Jiménez et al., 2023).

Para más información sobre esta sección, consulte el capítulo 2.1 del Apéndice B. Análisis biofísico SbN - CuencaVerde.





→ Fuente: CuencaVerde.

## Paso 1.2 y 1.3 Desarrollo y modelación de escenario tendencial o *Business as Usual*

Se desarrolló un escenario tendencial, también conocido como *Business as Usual* (BaU), donde se simuló la transformación esperada en la cuenca si no se implementaran las SbN y el uso de la tierra continuaran con la tendencia de transformación observada en los mapas de cobertura de suelo de los años 2000, 2012 y 2018. Además, se analizaron las dinámicas políticas y económicas actuales que pudieran contribuir a transformaciones en la región. Este escenario sin SbN ayudó a establecer un punto de comparación y a determinar el impacto de los diferentes escenarios de inversión de las SbN propuestas en el portafolio de CuencaVerde.

Para el desarrollo del escenario BaU, se utilizó la herramienta Dinámica EGO, cuyas siglas hacen referencia al concepto de Entorno para Objetos de Geoprociamiento (Padilla et al., 2015). Esta herramienta, aplicada en estudios de modelado de procesos de deforestación tropical y crecimiento urbano, permite desarrollar

modelos sofisticados que predicen el cambio de uso y cobertura del suelo. El proceso se desarrolló para el periodo 2024-2054, tomando como insumos la información recolectada en el paso 1.1, incluyendo variables ambientales, mapas básicos y temáticos, modelos digitales de elevación, cobertura vegetal, mapas topográficos, mapas geológicos e información sobre carbono y dinámicas ambientales proporcionadas por CuencaVerde.

El proceso llevó a la validación del modelo espacial, donde se generaron simulaciones al periodo temporal de 2018 y se contrastaron con las coberturas reales del mismo periodo. Los resultados mostraron más del 70 % de píxeles con alta concordancia, lo cual sugiere un modelo con un desempeño aceptable.

Para más información sobre este paso, consulte el capítulo 2.2 del Apéndice B. Análisis biofísico SbN - CuencaVerde.

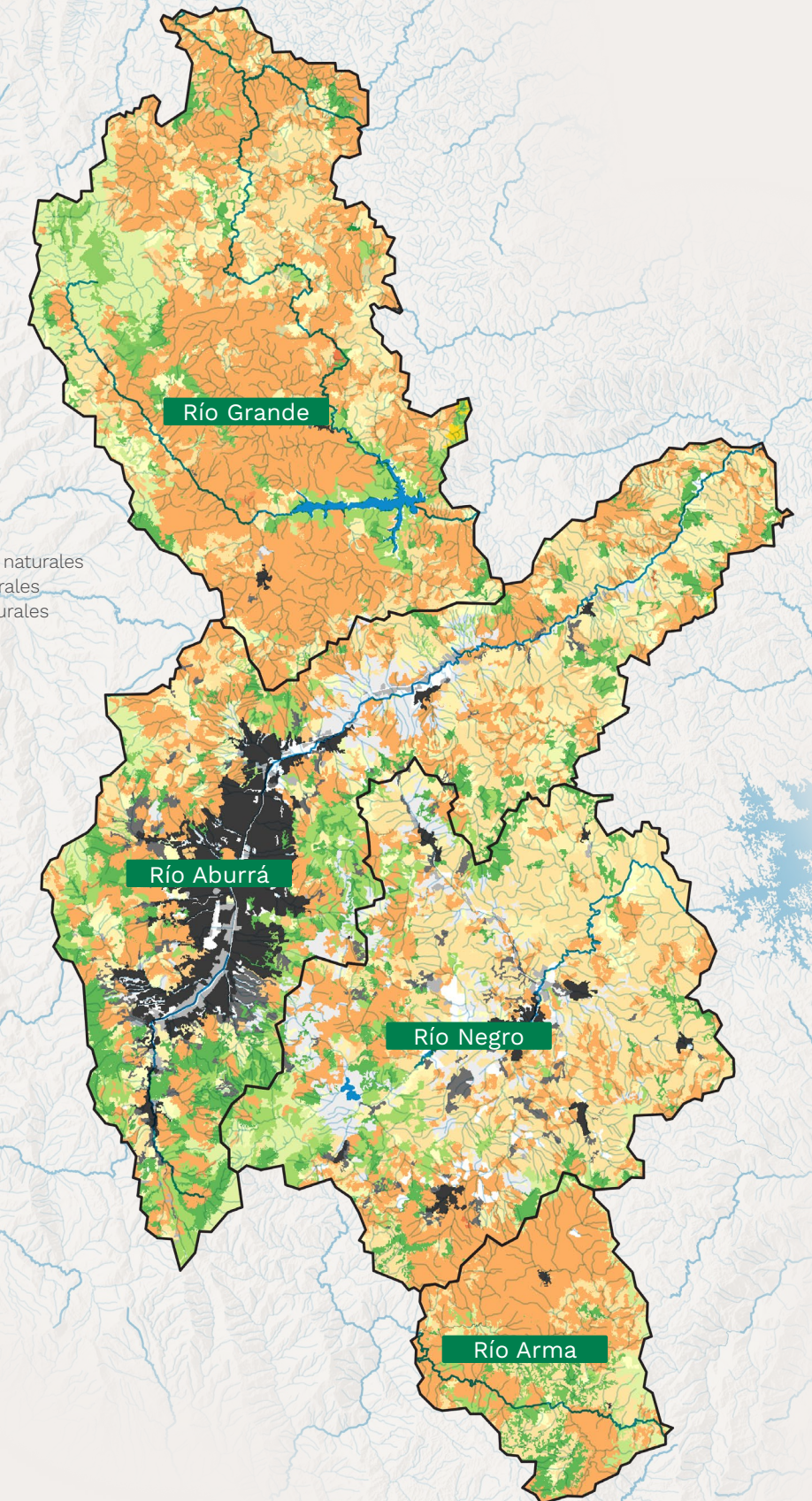
Figura 5. Escenario BaU 2054

- 1.1.1. Tejido urbano continuo
- 1.1.2. Tejido urbano discontinuo
- 1.2.1. Zonas industriales o comerciales
- 1.4.2. Instalaciones recreativas
- 2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos
- 2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos
- 2.3.1. Pastos limpios
- 2.3.2. Pastos arbolados
- 2.3.3. Pastos enmalezados
- 2.4.1. Mosaico de cultivos
- 2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos
- 2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales
- 2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales
- 2.4.5. Mosaico de cultivos con espacios naturales
- 3.1.1. Bosque denso
- 3.1.2. Bosque abierto
- 3.1.3. Bosque fragmentado
- 3.1.4. Bosque de galería y ripario
- 3.1.5. Bosque pantano
- 3.2.1. Herbazales
- 3.2.2. Arbustales
- 3.2.3. Vegetación secundaria o en transición
- 3.3.3. Tierras desnudas y degradadas
- 3.3.4. Zonas quemadas
- 4.1.1. Zonas pantanosas

## Resultados

Las principales transiciones observadas en el escenario BaU modelado (figura 5) reflejaron una reducción en coberturas entre el 2 y el 63 % de las categorías como Bosque denso (3.1.1), Bosque abierto (3.1.2), Bosque fragmentado (3.1.3) y Bosque de galería y ripario (3.1.4). Este comportamiento responde a un incremento en coberturas urbanas, pastos limpios, mosaico de pastos y cultivos (variación del 1 al 60 %).

Para más información sobre esta sección, consulte el capítulo 3.1.3 del Apéndice B. Análisis biofísico SbN - CuencaVerde.



Fuente: N4W (2024).





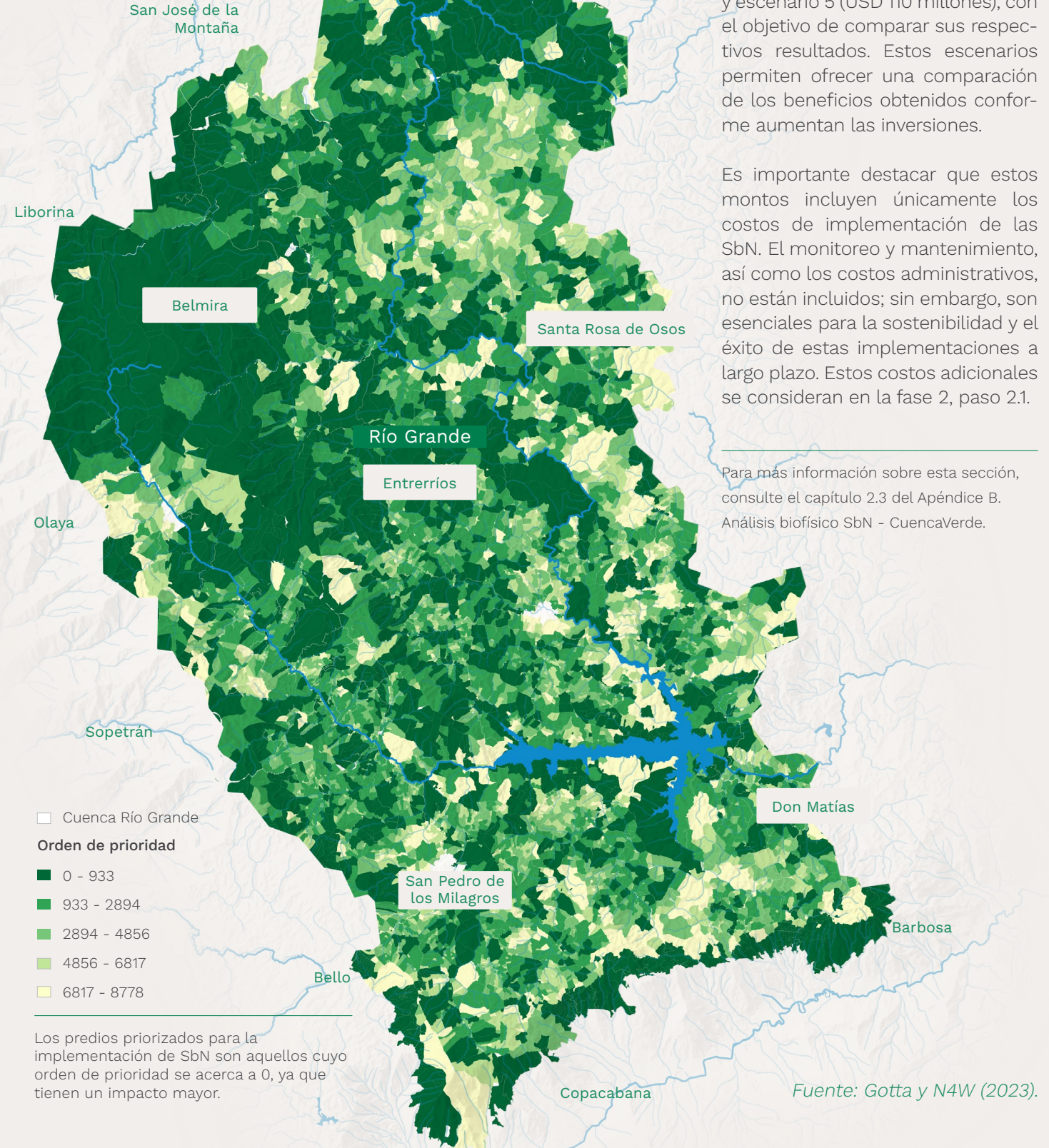
→ Fuente: CuencaVerde.

### Paso 1.4 Modelación SIGA-CAL de escenarios SbN

La elaboración de los escenarios de SbN se llevó a cabo utilizando dos elementos clave: el portafolio de intervenciones de CuencaVerde y la capa de priorización de predios específica para las unidades hidrográficas analizadas. La capa de priorización de predios (figura 6) fue desarrollada previamente por CuencaVerde y N4W (N4W, 2023). En esta capa se establecieron aquellos predios cuya implementación de SbN genera un mayor beneficio ambiental en la cuenca

en términos de reducción de sólidos suspendidos totales (SST), nitrógeno (N), fósforo (P), *Escherichia coli* (*E. coli*) y flujo base (Q). Esta capa se generó con un indicador de prioridad basado en la sumatoria de las contribuciones netas evitadas de las variables mencionadas por cada predio, de manera que se numeran de menor a mayor aquellos que generan un impacto positivo mucho mayor en la dinámica hidrosedimentológica y de calidad del agua de la cuenca.

Figura 6. Priorización de predios



Se construyeron 5 escenarios de implementación: escenario 1 (USD 10 millones), escenario 2 (USD 50 millones), escenario 3 (USD 70 millones), escenario 4 (USD 90 millones) y escenario 5 (USD 110 millones), con el objetivo de comparar sus respectivos resultados. Estos escenarios permiten ofrecer una comparación de los beneficios obtenidos conforme aumentan las inversiones.

Es importante destacar que estos montos incluyen únicamente los costos de implementación de las SbN. El monitoreo y mantenimiento, así como los costos administrativos, no están incluidos; sin embargo, son esenciales para la sostenibilidad y el éxito de estas implementaciones a largo plazo. Estos costos adicionales se consideran en la fase 2, paso 2.1.

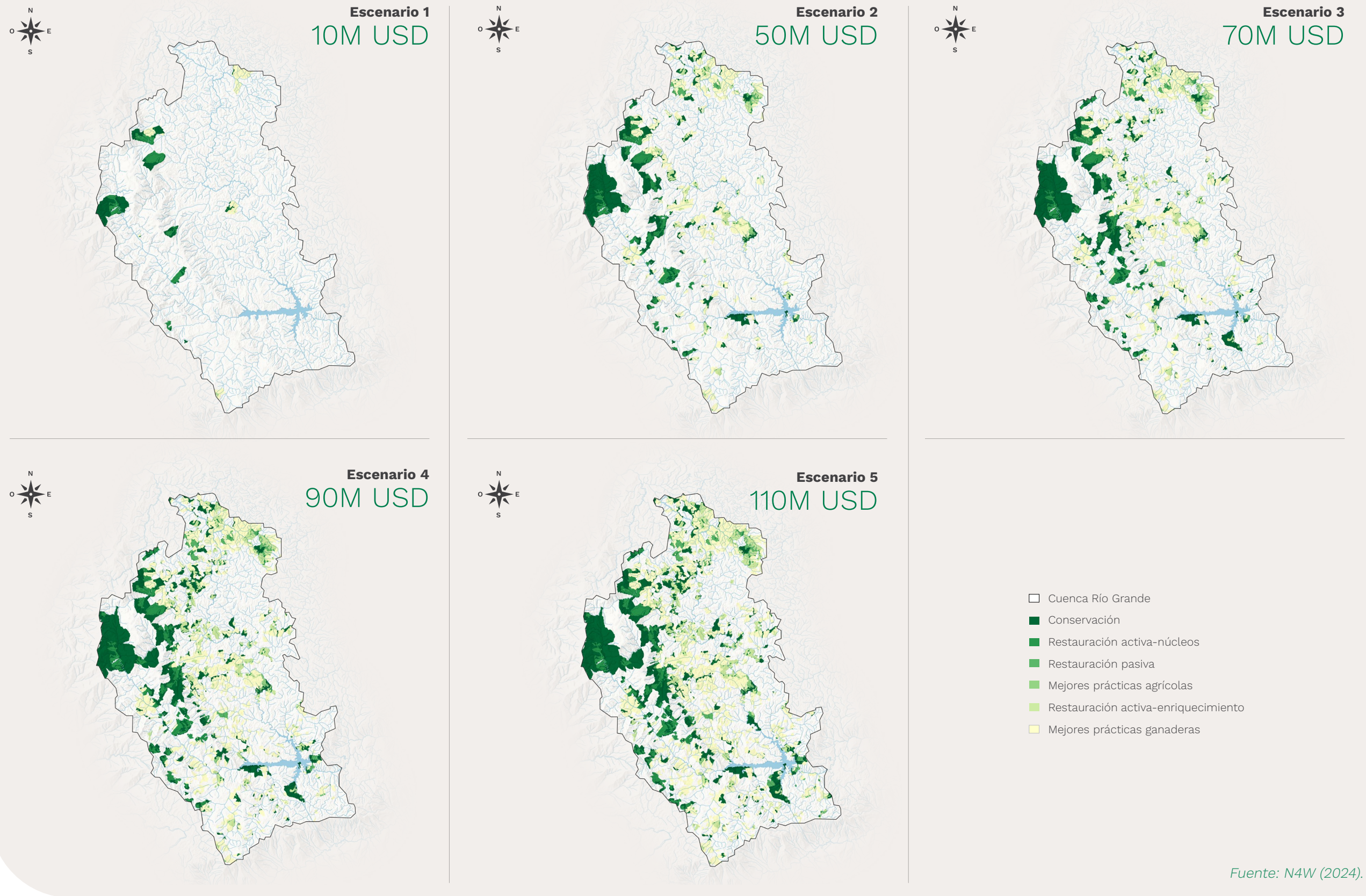
Para más información sobre esta sección, consulte el capítulo 2.3 del Apéndice B. Análisis biofísico SbN - CuencaVerde.

Fuente: Gotta y N4W (2023).

Caso de negocio: Análisis de relación beneficio-costos de inversiones en la naturaleza en la Cuenca del Río Grande, Colombia



**Figura 7.** Escenarios de implementación de SbN en la cuenca del río Grande



## Resultados

La figura 7 muestra la distribución espacial de los diferentes niveles de inversión. Las SbN priorizadas corresponden a conservación (áreas verde oscuro), restauración activa con núcleos (Verde medio), restauración pasiva (Verde claro), mejores prácticas agrícolas (Verde amarillo), restauración activa con enriquecimiento (Amarillo verdoso) y mejores prácticas ganaderas (amarillo claro). Como era de esperarse, a medida que aumenta el nivel de inversión, se incrementan las áreas destinadas a cada categoría de intervención.

Fuente: N4W (2024).









La tabla 2 presenta el número de hectáreas por cada una de las SbN para cada uno de los escenarios de inversión. Considerando el área total de la cuenca del río Grande, que corresponde a 106.244 ha, el escenario 1 abarca aproximadamente el 3,5 % de la cuenca; en el escenario 2, la cobertura se amplía al 17,5 %; en el escenario 3, al 24,5 % de la cuen-

ca; en el escenario 4, al 31,4 %; y finalmente, el escenario 5 alcanza una intervención de casi el 38,2 % del área total de la cuenca.

Para más información sobre esta sección, consulte el capítulo 3.2 del Apéndice B. Análisis biofísico SbN - CuencaVerde.

**Tabla 2.** Hectáreas por SbN en la cuenca del río Grande

Escenarios USD M	ÁREA EN HECTAREAS (ha)						Área total (ha)
	 Conservación	 Restauración activa - núcleos	 Restauración pasiva	 Mejores prácticas agrícolas	 Restauración activa - enriquecimiento	 Mejores prácticas ganaderas	
1 (USD 10 M)	1.590,75	1.129,25			27,5	973	3.720,5
2 (USD 50 M)	6.442,5	2.684,25	355	126	1.547,25	7.473,25	18.628,25
3 (USD 70 M)	8.553,75	3.402,75	588	168,5	2.427,25	10.871,25	26.011,5
4 (USD 90 M)	10.268,75	3.850,5	792	169,25	3.501,25	14.751,25	33.333
5 (USD 110 M)	11.588	4.290,5	974,25	169,5	4.471	19.052,25	40.545,5



→ Fuente: CuencaVerde.

A partir de los escenarios SbN y el escenario BaU, se generaron diferentes simulaciones utilizando el modelo SIGA-CAL, evaluando los cambios en la cobertura del suelo en un periodo de 30 años y sus efectos en las variables de interés (Q, SST, N, P y *E. coli*).

Los resultados de los escenarios SbN muestran una notable disminución en la carga de sedimentos, con reducciones que van desde el 2,9 % en el escenario 1 hasta más de la mitad de los sedimentos en el escenario 4. Además, los percentiles extremos de eventos

(2 % - 10 %) indican una reducción significativa del 43,80 % en la carga de sedimentos para el escenario 1, llegando hasta un 77,58 % para el escenario 5. Asimismo, en este último escenario se reporta una disminución aproximada del 20 % en N y del 10 % en P, y una tendencia decreciente en la presencia de *E. coli*, con una disminución que alcanza el 20 %. Estos resultados confirman la efectividad de las SbN en la mejora de la calidad en todas las variables de interés, principalmente en los escenarios de mayor inversión, como se observa en la tabla 3.

Tabla 3. Reducción de concentraciones por escenario

Punto	Variable	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5
Embalse	SST (kg/m <sup>3</sup> )	↓ -4,0 %	↓ -11,8 %	↓ -16,4 %	↓ -21,1 %	↓ -25,4 %
	NO (kg/m <sup>3</sup> )	↓ -0,2 %	↓ -2,8 %	↓ -5,8 %	↓ -10,5 %	↓ -14,7 %
	PO (kg/m <sup>3</sup> )	↓ -0,2 %	↓ -2,4 %	↓ -4,9 %	↓ -8,8 %	↓ -12,2 %
	EC (kg/m <sup>3</sup> )	↓ -0,1 %	↓ -0,8 %	↓ -1,6 %	↓ -3,8 %	↓ -4,8 %
Quebrada El Hato	SST (kg/m <sup>3</sup> )	↓ -8,3 %	↓ -27,0 %	↓ -32,0 %	↓ -32,0 %	↓ -32,0 %
	NO (kg/m <sup>3</sup> )	↓ -8,4 %	↓ -31,4 %	↓ -46,5 %	↓ -48,0 %	↓ -51,0 %
	PO (kg/m <sup>3</sup> )	↓ -7,5 %	↓ -23,1 %	↓ -31,2 %	↓ -33,4 %	↓ -36,2 %
	EC (kg/m <sup>3</sup> )	↓ -2,2 %	↓ -11,1 %	↓ -20,9 %	↓ -20,2 %	↓ -20,6 %
Quebrada San Francisco	SST (kg/m <sup>3</sup> )	↓ -0,1 %	↓ -7,1 %	↓ -22,7 %	↓ -27,6 %	↓ -31,7 %
	NO (kg/m <sup>3</sup> )	↓ -1,5 %	↓ -7,0 %	↓ -22,0 %	↓ -24,0 %	↓ -30,5 %
	PO (kg/m <sup>3</sup> )	↓ -3,0 %	↓ -8,8 %	↓ -24,0 %	↓ -27,0 %	↓ -35,0 %
	EC (kg/m <sup>3</sup> )	↓ -1,0 %	↓ -6,0 %	↓ -15,0 %	↓ -16,0 %	↓ -20,0 %
Quebrada Montenegro	SST (kg/m <sup>3</sup> )	↓ -0,5 %	↓ -7,1 %	↓ -22,7 %	↓ -27,6 %	↓ -31,7 %
	NO (kg/m <sup>3</sup> )	↓ -2,0 %	↓ -8,0 %	↓ -23,0 %	↓ -26,0 %	↓ -32,0 %
	PO (kg/m <sup>3</sup> )	↓ -3,0 %	↓ -10,0 %	↓ -27,0 %	↓ -30,0 %	↓ -34,0 %
	EC (kg/m <sup>3</sup> )	↓ -1,0 %	↓ -6,0 %	↓ -15,0 %	↓ -16,0 %	↓ -20,0 %
Quebrada Montañita	SST (kg/m <sup>3</sup> )	↓ -1,5 %	↓ -4,4 %	↓ -9,5 %	↓ -12,4 %	↓ -18,2 %
	NO (kg/m <sup>3</sup> )	↓ -1,5 %	↓ -3,6 %	↓ -9,5 %	↓ -11,6 %	↓ -13,9 %
	PO (kg/m <sup>3</sup> )	↓ -1,0 %	↓ -2,5 %	↓ -8,0 %	↓ -10,0 %	↓ -12,0 %
	EC (kg/m <sup>3</sup> )	↓ -2,0 %	↓ -5,0 %	↓ -9,0 %	↓ -15,0 %	↓ -20,0 %
Quebrada Mogotes	SST (kg/m <sup>3</sup> )	↓ -8,1 %	↓ -7,1 %	↓ -7,7 %	↓ -6,6 %	↓ -7,6 %
	NO (kg/m <sup>3</sup> )	↓ -5,0 %	↓ -7,0 %	↓ -8,0 %	↓ -15,0 %	↓ -16,0 %
	PO (kg/m <sup>3</sup> )	↓ -4,0 %	↓ -6,0 %	↓ -7,0 %	↓ -14,0 %	↓ -15,0 %
	EC (kg/m <sup>3</sup> )	↓ -5,0 %	↓ -7,0 %	↓ -8,0 %	↓ -15,0 %	↓ -16,0 %

↓ = disminución de variable.

La tabla de resultados revela una tendencia clara: a medida que la inversión aumenta, los beneficios incrementan consistentemente hasta estabilizarse en los escenarios de mayor inversión. En este sentido, destaca que el escenario 5, en términos de área intervenida, podría estar cerca de la condición óptima. Este análisis se fundamenta en el área de intervención, que, según los resultados del portafolio priorizado,

indica que la condición óptima de intervención se sitúa en torno a las 39.316 hectáreas. En este contexto, es posible que intervenciones que superen los USD 110 millones generen contribuciones marginales en relación con la inversión.

Para más información sobre esta sección, consulte el capítulo 3.3 del Apéndice B. Análisis biofísico SbN - CuencaVerde.

## Paso 1.5 Estimación de beneficios adicionales

### Modelo de almacenamiento y secuestro de carbono

Complementario a los análisis hidrosedimentológicos y de calidad de agua, se estimaron los cobeneficios, de almacenamiento de carbono para los diferentes escenarios propuestos (BaU y SbN). Este análisis utilizó el modelo *Invest Carbon Storage and Sequestration* desarrollado por el Natural Capital Project. El modelo *Invest* es un modelo espacialmente explícito que considera el secuestro de carbono en una parcela de tierra (píxel), teniendo en cuenta cuatro reservas de carbono: biomasa aérea, biomasa subterránea, suelo y materia orgánica muerta. En este sentido, el modelo cuantifica dichos almacenamientos dependiendo de las capacidades de secuestro por cobertura de suelo que ocupe el píxel.

Los resultados obtenidos se combinan con el carbono asignado a las clases no forestales a través de los métodos de inventario tradicionales (Panel Intergubernamental del Cambio Climático [IPCC], 2006) utilizados en el modelo de carbono *Invest*, para generar un mapa de almacenamiento de carbono para todas las clases de cobertura del suelo.

Para más información sobre esta sección, consulte el capítulo 2.4.2 del Apéndice B. Análisis biofísico SbN - CuencaVerde.

### Resultados

En la figura 8 se muestran los resultados del almacenamiento de carbono distribuidos espacialmente en el área de la cuenca. Estos resultados representan el carbono almacenado por las diferentes coberturas. La figura indica el valor neto por píxel y en unidades de toneladas.

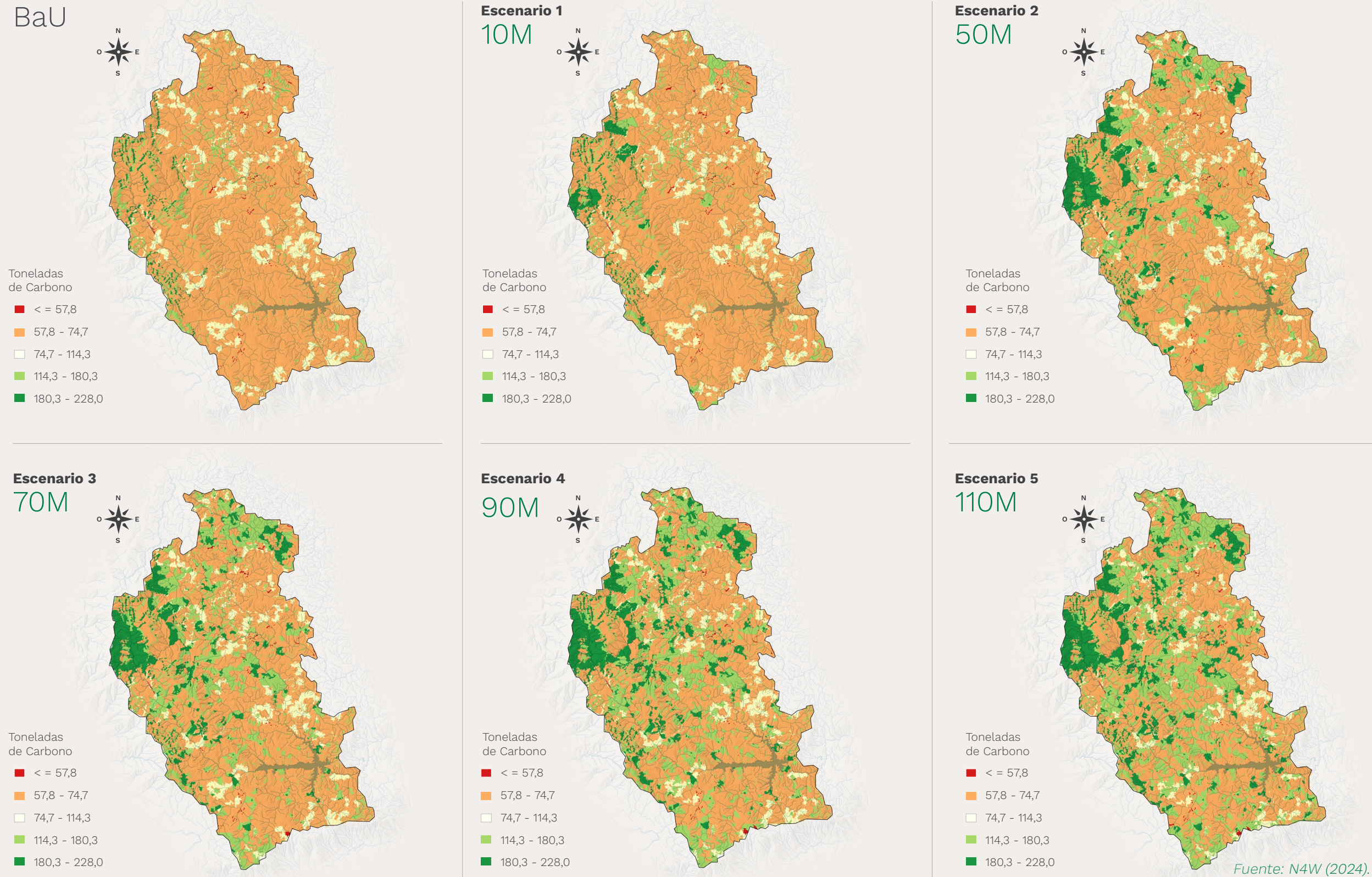
El escenario BaU muestra un almacenamiento donde predominan las coberturas con un almacenamiento de 57,8 a 114,3 toneladas de carbono. Asimismo, las coberturas con los niveles más altos de almacenamiento (entre 180,3 y 228 toneladas) son prácticamente inexistentes.

En contraste, en el escenario SbN 1, comienzan a evidenciarse cambios, manifestándose con coberturas en colores verdes que indican un incremento en el rango de almacenamiento de carbono. Sin embargo, la mayor parte del territorio aún se mantiene dentro de los rangos medios, entre 57,8 y 114,3 toneladas.

Del escenario 2 en adelante, se produce un cambio drástico en el almacenamiento del carbono. Este aumento es evidente en los escenarios 4 y 5, en coberturas con un potencial de almacenamiento de 114,3 a 228 toneladas de carbono diferenciadas por el color verde. Esto indica un incremento generalizado en el almacenamiento de carbono a lo largo de la cuenca, reiterando la relación directamente proporcional entre la inversión en SbN y el aumento en el almacenamiento de carbono.



**Figura 8.** Resultados de almacenamiento de carbono en la cuenca de los ríos Grande y Chico



En términos generales, los resultados del modelo muestran que los cinco escenarios de implementación de SbN logran aumentos notables en el almacenamiento de carbono gracias a las transformaciones de coberturas comparados con el escenario BaU. Esto sugiere un potencial significativo para la implementación de bonos de carbono, apoyando la financiación de iniciativas de conservación y manejo forestal sostenible.

Sin embargo, en caso de establecerse un instrumento de bonos de carbono, es crucial desarrollar modelos más detallados que permitan estimaciones específicas por tipos de intervención y tipos de cobertura vegetal, así como estimaciones a corto plazo que reduzcan la incertidumbre y optimicen la eficacia de estas intervenciones.

En el análisis de la relación beneficio-costos, se calculó el CO<sub>2</sub> equivalente utilizando factores de emisión basados en la cantidad de CO<sub>2</sub> que se libera cuando una hectárea es deforestada, y específicamente la ubicación de las áreas enfocadas en la SbN de conservación. Este proceso se describe en el paso 2.4.

Fuente: N4W (2024).

Para más información sobre esta sección, consulte el capítulo 3.4 del Apéndice B. Análisis biofísico SbN - CuencaVerde.





→ Tijereta  
(Tyrannus savana)

## Fase 2

### Análisis de relación beneficio-costo

El análisis de relación beneficio-costo (RBC) es una herramienta analítica ampliamente utilizada en la evaluación económica de políticas, proyectos públicos e inversiones privadas. La RBC implica identificar y cuantificar los impactos (costos y beneficios) de un proyecto dentro del ámbito del análisis, expresándolos en términos monetarios cuan-

do sea posible. La comparación sistemática de costos y beneficios permite evaluar la ganancia neta financiera o de bienestar social de un proyecto, así como identificar el proyecto financiera o económicamente preferido entre varias alternativas. Para calcular la relación beneficio-costo del proyecto, se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Relación beneficio-costo} = \text{beneficios} - \text{costos del programa (implementación, monitoreo, mantenimiento, administrativos)}$$

## Costos

- **Costos administrativos:** incluyen los costos de CuencaVerde, como nómina, alcance de actores, educación ambiental, comunicación y asesorías legales y contables.
- **Implementación de SbN:** según los escenarios de inversión inicial, de USD 10, 50, 70, 90 y 110 millones, sumados a los costos de mantenimiento y monitoreo de las intervenciones.

- Costos evitados por el tratamiento y/o manejo de los sedimentos en los embalses de EPM.
- **Beneficios por costos evitados del carbono social**

El valor monetario de los daños evitados asociados con la reducción de concentraciones atmosféricas de carbono.

## Paso 2.1 Estimación de costos de las inversiones en SbN

## Beneficios

- **Beneficios para acueductos veredales y EPM**
- Costos evitados en el tratamiento de agua para acueductos veredales.

Los costos de las inversiones se componen de tres elementos: costo de implementación, costo de mantenimiento y costo de monitoreo, calculados mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Costos de inversiones (SbN)} = (\text{área de implementación} \times \text{costo de implementación por ha}) + (\text{área de implementación} \times \text{costo de mantenimiento y monitoreo por ha})$$

→ Fuente: CuencaVerde.





Para obtener los costos de implementación de las inversiones, se consideraron tres insumos principales:

1. La priorización de predios específica para las unidades hidrográficas analizadas (figura 6).
2. El portafolio de SbN para la cuenca del río Grande (tabla 1).

3. El valor unitario por hectárea de implementación de cada una de las SbN, según la experiencia previa de CuencaVerde (tabla 4).

Con estos costos, se estimó la cantidad de SbN que se pueden implementar a través de los cinco diferentes escenarios de inversión.

Tabla 4. Costo de implementación para cada SbN (equivalencia de COP 4.000 a USD)

 <p>Mejores prácticas ganaderas</p> <p><b>\$2.135</b> USD/ha</p>	 <p>Restauración activa - núcleos</p> <p><b>\$3.298</b> USD/ha</p>	 <p>Restauración pasiva</p> <p><b>\$2.135</b> USD/ha</p>
 <p>Mejores prácticas agrícolas</p> <p><b>\$2.659</b> USD/ha</p>	 <p>Restauración activa - enriquecimiento</p> <p><b>\$3.298</b> USD/ha</p>	 <p>Conservación</p> <p><b>\$2.828</b> USD/ha</p>

Fuente: CuencaVerde (2024).



→ Fuente: CuencaVerde.

Los costos de mantenimiento y monitoreo de las SbN representan aproximadamente un 30 % del valor del costo de la implementación (en términos de valor presente neto [VPN]). El mantenimiento se realiza cuatro veces, comenzando el año siguiente a la implementación de la SbN, mientras que el monitoreo se lleva a cabo una vez al año durante los primeros cinco años, y posteriormente, cada tres años. Estos costos de monitoreo y mantenimiento fueron validados por CuencaVerde e incluyen acciones adicionales que actualmente no realiza CuencaVerde, como el monitoreo satelital y la limpieza de

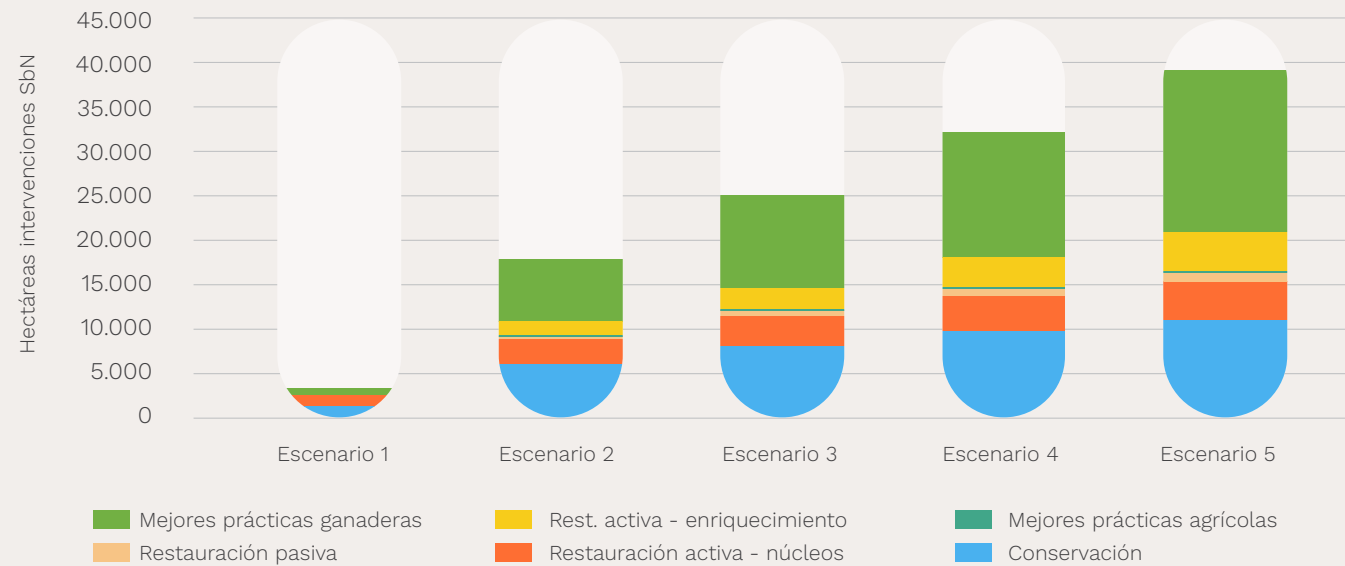
zonas intervenidas afectadas por especies invasoras que ponen en peligro las intervenciones de SbN. Estas acciones adicionales se consideran para fortalecer el mantenimiento del programa y la efectividad de las SbN a largo plazo.

### Resultados

En la figura 9 se detallan las hectáreas de intervención para cada uno de los escenarios proyectados a 30 años, con los respectivos totales de las áreas de cada SbN para la cuenca del río Grande.

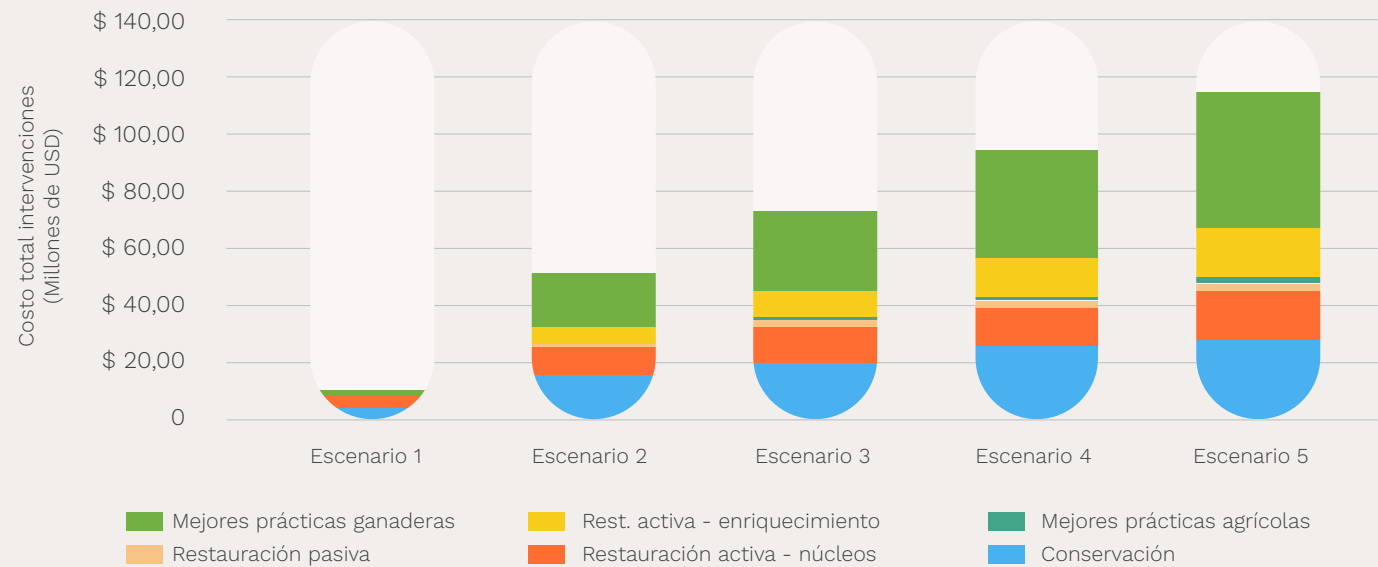


**Figura 9.** Hectáreas de intervención según la SbN para la cuenca del río Grande



Fuente: N4W (2024).

**Figura 10.** Costo en VPN de las intervenciones de SbN



Fuente: N4W (2024).

Entendiendo el valor presente neto (VPN) como la relación matemática que permite calcular el valor actual de los costos de las implementaciones que se realizarán en los próximos 30

años, la figura 10 presenta los costos de intervenciones de SbN (implementación, mantenimiento y monitoreo) en los cinco escenarios, utilizando una tasa de descuento del 3,5 %.

## Paso 2.2 Estimación de costos del programa

Los costos del programa fueron compartidos por CuencaVerde y están basados en su experiencia en la implementación y gestión. En esta sección se incluyen costos operativos y de personal,

costos de alcance de actores, educación ambiental, comunicación, y las asesorías legales y contables. **Estos costos se calcularon según valores históricos de CuencaVerde.**

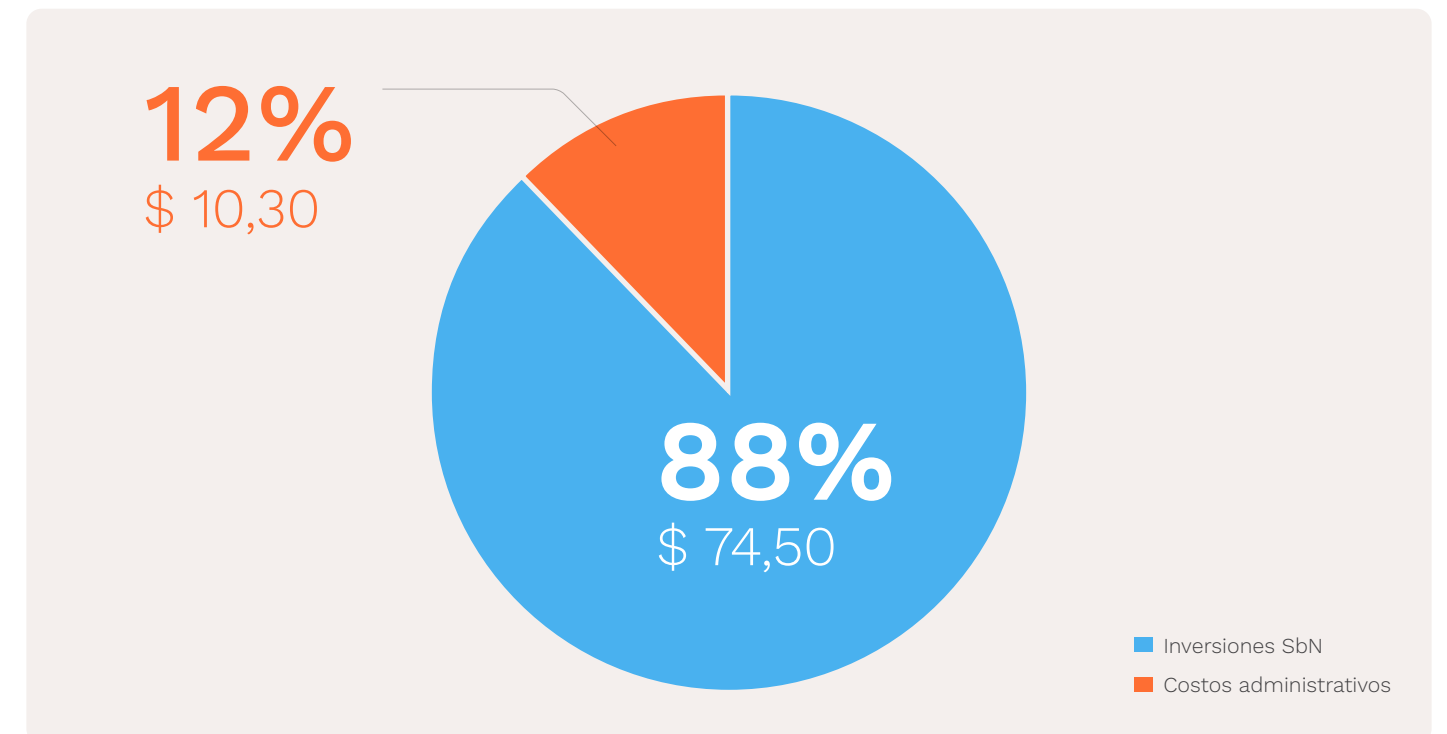
$$\text{Costos administrativos} = \text{costos operativos (personal, asesorías legales y contables)} + \text{costos de gobernanza del agua (alcance de actores, comunicación, educación ambiental)} + \text{costos de fortalecimiento institucional}$$

### Resultados

Como ejemplo, la figura 11 muestra los resultados de los costos aso-

ciados a las inversiones SbN y los costos administrativos para el escenario 3. Estos costos representan un 12 % del total en ese escenario.

**Figura 11.** Costos de inversiones y administrativos para el escenario 3 (costo en VPN y porcentaje)



Fuente: N4W (2024).





→ Fuente: CuencaVerde.

## Paso 2.3 Monetización de beneficios

La priorización de intervenciones se realizó bajo un enfoque de gestión de cuencas, enfatizando su capacidad para mejorar la calidad del agua en toda la cuenca. La ubicación de las distintas intervenciones está directamente relacionada con este objetivo. El enfoque de cuenca reconoce a este sistema como un entorno hídrico interconectado que abarca diversas dinámicas físicas, bióticas, sociales y económicas. En este análisis, se han considerado específicamente los beneficios percibidos

por las empresas prestadoras de servicios públicos de acueductos y alcantarillados, dadas las oportunidades que brinda la Resolución CRA 907 de 2019.

### Paso 2.3.1 Costos evitados por tratamiento de agua - acueductos veredales

Para calcular la reducción de costos para los acueductos se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Costos evitados por tratamiento de agua} = [\text{costo de tratamiento (BaU)} - \text{costo de tratamiento (SbN)}]$$

Los acueductos veredales incluidos en el análisis son: AASA (San Pedro de los Milagros); Acuasfran (San Pedro de los Milagros); Empubel - Montañitas (Belmira) y Empubel - Mogotes (Belmira). Estos acueductos fueron seleccionados por su relevancia dentro del grupo de práctica y como casos de estudio para la implementación de la Resolución CRA 907 de 2019. Además, ocupan

una posición estratégica en la cuenca, convirtiéndolos en los principales beneficiarios de las posibles implementaciones en el territorio.

Para calcular los costos de tratamiento tanto en el escenario BaU como en los escenarios de SbN, se utilizaron las funciones de costo descritas por Rogéliz et al. (2022). Estas funciones están diseñadas para estimar el

costo de operación y mantenimiento (O&M) de cada uno de los procesos en plantas de tratamiento de agua potable, segregados en 1) costo de materiales, 2) costo de mano de obra y 3) costo de energía. Para la aplicación de las funciones de costo, se utilizó información de caudal (l/s), carga de sedimentos (toneladas), concentración de nitrógeno (mg/l), concentración de fósforo (mg/l) y concentración de sedimentos (mg/l) para cada uno de los acueductos según los resultados para cada uno de los escenarios (BaU, USD 10 M, 50 M, 70 M, 90 M y 110 M). Para realizar este balance hídrico, de concentración y carga, se tuvo en cuenta el diseño específico de cada planta de tratamiento de agua.

Los resultados obtenidos se multiplicaron por el factor regional de Colombia (0,38) recomendado por Rogéliz et al. (2022), el cual permite generar una equivalencia con la economía del país. Posteriormente, los resultados obtenidos se compararon con los valores reales de costo compartidos por los prestadores de servicios. En aquellos casos en que las funciones de costo no simulaban correctamente los valores, se ajustaron modificando los factores de elasticidad incluidos en las funciones de costo (Rogéliz et al., 2022).

Para mayor detalle de la metodología usada, consulte el Apéndice C. Monetización de los beneficios para los acueductos veredales. También se recomienda acceder al Apéndice A. Memoria de cálculo, donde es posible visualizar la información contenida en cada uno de los pasos: 1) premisas e información primaria; 2) resultados de los modelos hidrológicos para cada elementos de las plantas de tratamiento de agua potable en los 30 años; 3) aplicación y

resultado de las funciones de costo para cada uno de los escenarios; 4) uso del factor regional, los coeficientes de elasticidad y factores de corrección; 5) resultados resumidos para cada elemento en cada escenario o por cada tipo de costos (energía, mano de obra y materiales); y 6) resultados finales, gráficas y demás.

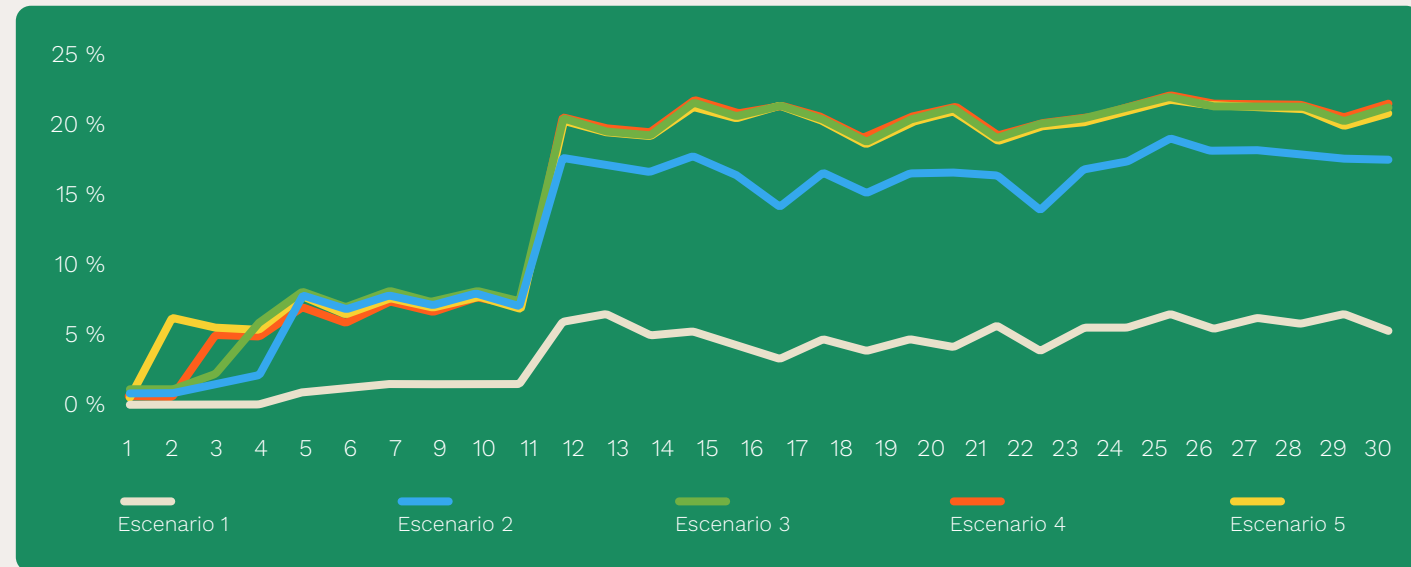
## Resultados

### ASSA

Según lo detallado en la figura 12, se espera que con la intervención del portafolio de SbN en la cuenca del río Grande, el acueducto de AASA en el municipio de San Pedro de los Milagros pueda percibir una reducción de hasta el 23 % en los costos anuales de operación de su planta de tratamiento de agua. En los primeros 10 años, la reducción de costos será menor, ya que en ese periodo se realizan las intervenciones y las inversiones en restauración están madurando hasta conformar las nuevas coberturas. A partir del año 11, comenzarán a notarse los ahorros, y se esperan resultados significativos para todos los escenarios, con mayor impacto desde el escenario 2 (USD 50 millones de costos de implementación). Los escenarios 3, 4 y 5 presentan resultados similares en términos de reducción de costos a partir del año 7. Esto se debe a que la mayoría de los predios que impactan la subcuenca que provee el agua de AASA son intervenidos entre los escenarios 2 y 3. En consecuencia, las intervenciones en los escenarios 4 y 5 se ejecutarían en otras partes de la cuenca, beneficiando a los actores ubicados en estas zonas. En este caso, se observan beneficios importantes para el prestador de servicio Acuasfran (figura 14).



**Figura 12.** Porcentaje de ahorro en los costos del tratamiento de agua potable para AASA



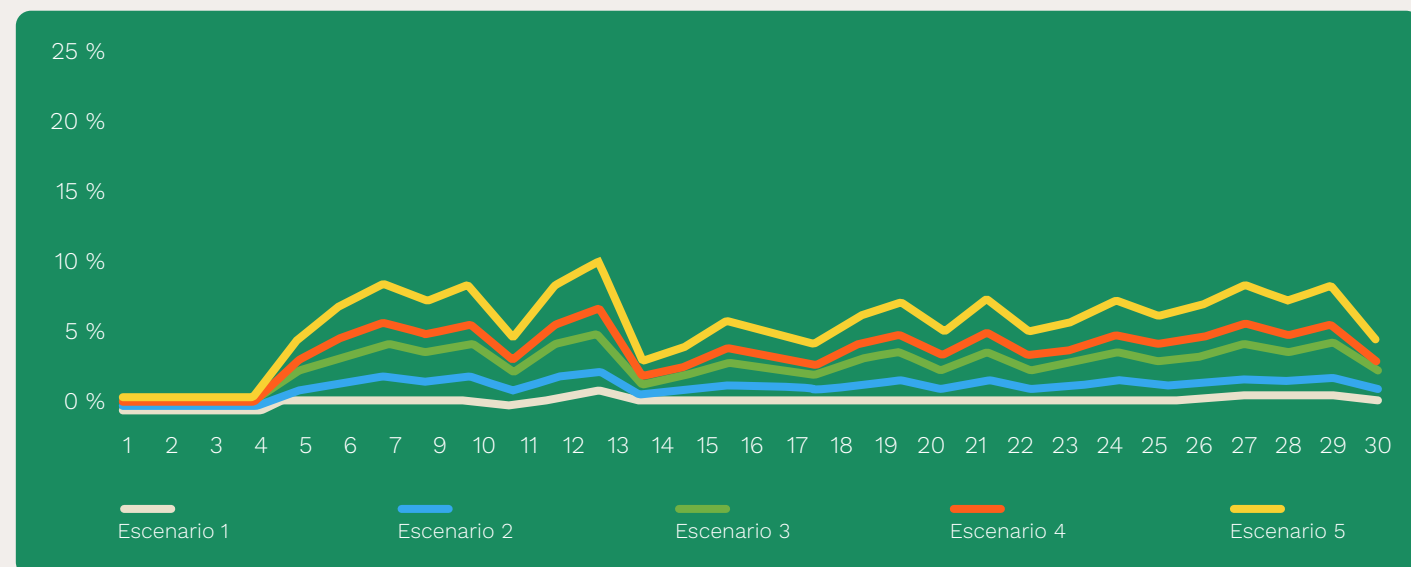
Fuente: N4W (2024).

**Empubel**

Para el caso de Empubel, se puede observar en la figura 13 que el mayor ahorro en costos se tendrá alrededor del año 12, con un valor cercano al 10 % en el escenario 5

(USD 110 millones de costos de implementación). En este acueducto, los cambios entre escenarios varían de manera similar al aumento de las inversiones en la cuenca, presentándose un crecimiento homogéneo entre cada escenario.

**Figura 13.** Porcentaje de ahorro en los costos del tratamiento de agua potable para Empubel

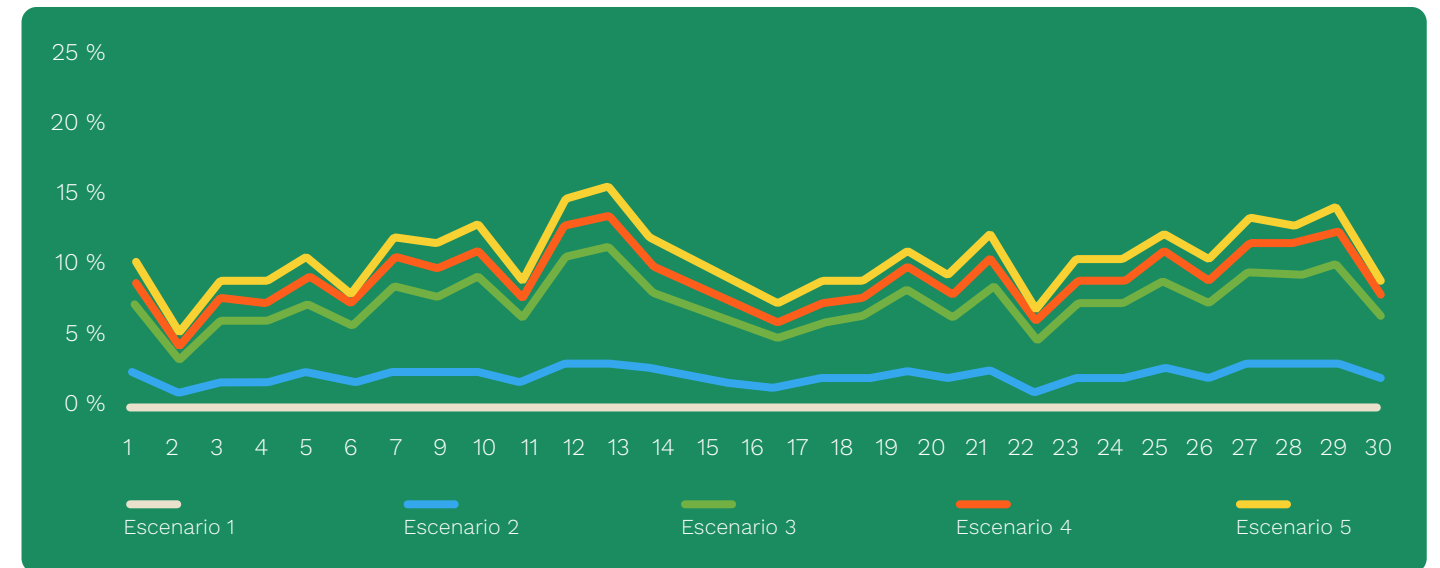


Fuente: N4W (2024).

**Acuasfran**

En el acueducto veredal de Acuasfran se observan ahorros de hasta el 15 % en los costos de la planta de tratamiento, con resultados más positivos en los escenarios 3, 4 y 5.

**Figura 14.** Porcentaje de ahorro en los costos del tratamiento de agua potable para Acuasfran

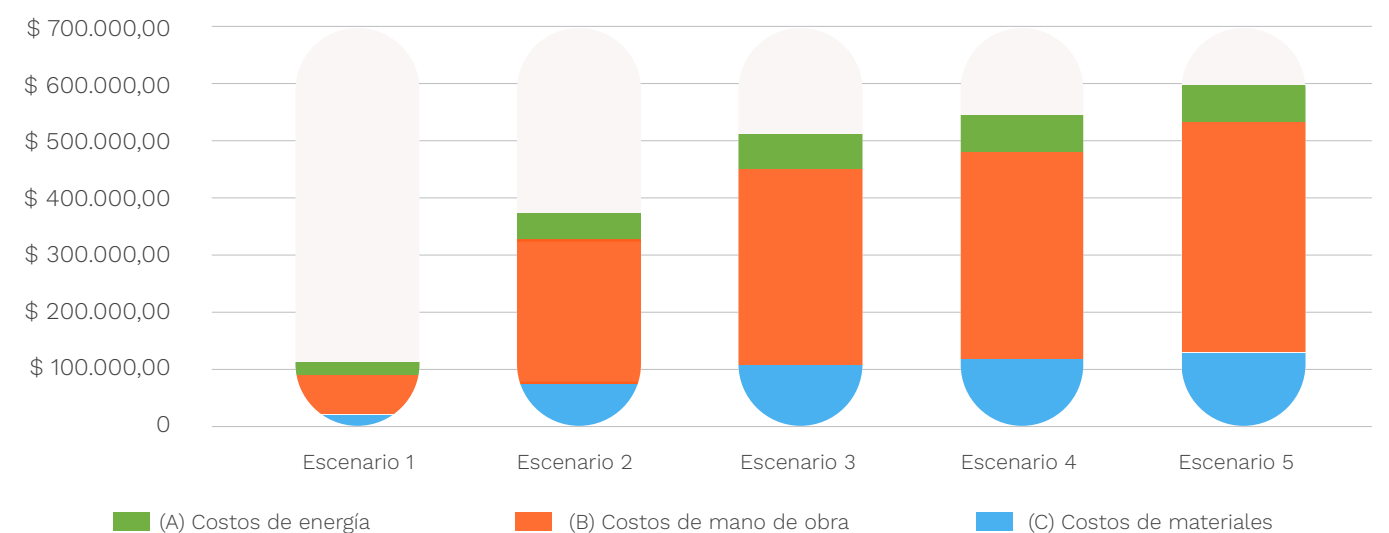


Fuente: N4W (2024).

Finalmente, en la figura 15 se resumen los costos evitados en VPN para los tres acueductos.

Para más detalle de la metodología utilizada, consulte los Apéndices C y A.

**Figura 15.** Costo evitado en el proceso de tratamiento de agua para los acueductos veredales (VPN)



Fuente: N4W (2024).



### Paso 2.3.2 Costos evitados por el manejo de sedimentos en el embalse Riogrande II

El embalse Riogrande II, operado por EPM, cumple una doble función crucial: la generación de energía y el suministro de agua potable para el Valle de Aburrá. Dada su naturaleza abierta, mantiene una estrecha interacción con la cuenca y se ve afectado por los procesos que ocurren en ella (Mazo et al., 2015). Por lo tanto, un aumento en la erosión resulta en una mayor entrada de sedimentos al embalse, lo que a su vez podría reducir su vida útil. Según los informes de batimetría realizados por EPM, la sedimentación en el embalse Riogrande II se ha mantenido estable. Sin embargo,

es previsible que, con el tiempo, y en particular con el cambio de cobertura de suelos pronosticado en el escenario BaU, los sedimentos acumulados en el sistema necesiten ser gestionados.

La implementación del portafolio de SbN puede evitar y reducir la entrada de los sedimentos en suspensión (SST) y de fracciones más gruesas que llegan al embalse, contribuyendo a la sedimentación de partículas y reduciendo la capacidad del embalse más allá de su volumen muerto. Por tanto, su reducción conlleva una disminución en los costos asociados a las técnicas de manejo de sedimentos o una prolongación de su vida útil. Para calcular los ahorros al aumentar la vida útil del embalse, se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Costos evitados por manejo de sedimentos} = [\text{costos de manejo de sedimentos (BaU)}] - [\text{costos con manejo de sedimentos (SbN)}]$$

Para determinar el momento en que se requiere iniciar la gestión de sedimentos en el embalse, se siguió la recomendación de la Western Dredging Association (WEDA), que sugiere intervenir cuando el volumen muerto alcanza el 25 % de su capacidad (WEDA, 2021). Para calcular este punto de referencia, se utilizó un modelo conceptual de transporte de sedimentos desarrollado específicamente para el embalse, basado en la proporción de sedimentos de fondo del río Grande (Cataño-Álvarez y Vélez-Upegui, 2016). Utilizando este valor como línea base, se llevó a cabo una modelación sedimen-

tológica para cada uno de los escenarios de SbN, determinando el total de sedimentos que llegan al embalse. Posteriormente, la cantidad de sedimentos que deberían ser gestionados se multiplicó por el costo unitario reportado por EPM para la gestión de sedimentos: COP 802.490/m<sup>3</sup> o USD 200/m<sup>3</sup> (Global Green Growth Institute [GGGI], 2023), y se halló el valor o costo postergado para la gestión de los sedimentos.

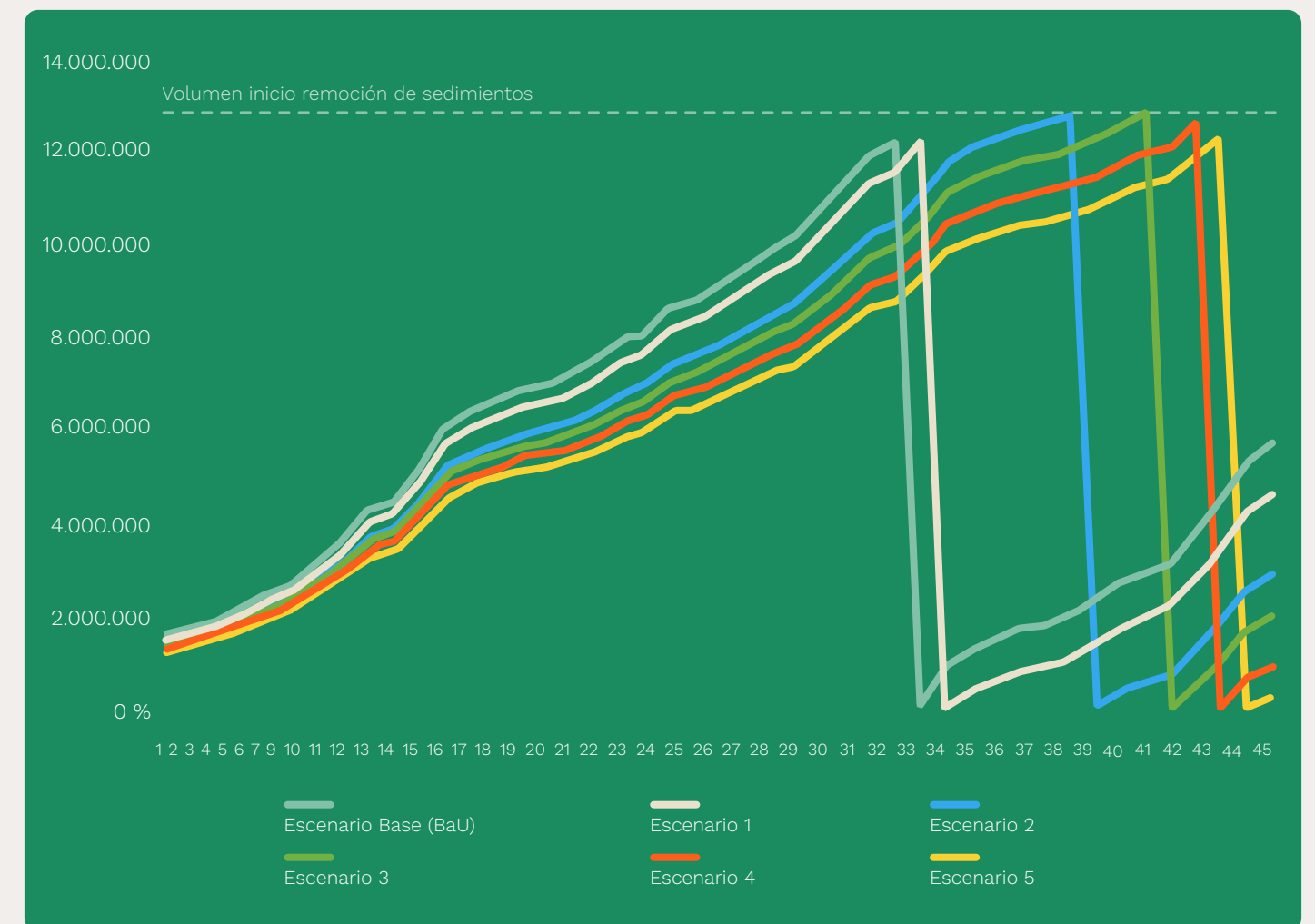
Para mayor detalle sobre la metodología utilizada, consulte el Apéndice D. Manejo de sedimentos del embalse Riogrande.

### Resultados

La figura 17 muestra la acumulación de sedimentos, considerando la dinámica de la cuenca en cada uno de los escenarios y el momento recomendado por la WEDA para iniciar las actividades de manejo de sedimentos en embalses similares. Los resultados indican que la imple-

mentación de SbN puede prolongar la necesidad de manejar sedimentos entre 1 y 13 años, dependiendo del escenario de intervención. Este aumento en la vida útil del embalse tendrá efectos positivos significativos en su uso y gestión a largo plazo, permitiendo postergar los potenciales costos asociados al manejo de sedimentos.

Figura 16. Análisis del manejo de sedimentos del embalse Riogrande



Fuente: N4W (2024).



## Paso 2.4 Monetización del costo social del carbono

El costo social del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) representa el valor económico de los daños causados a la sociedad por cada tonelada adicional de CO<sub>2</sub> emitida a la atmósfera (Rennert et al., 2022). En esta sección se evalúa el costo social evitado

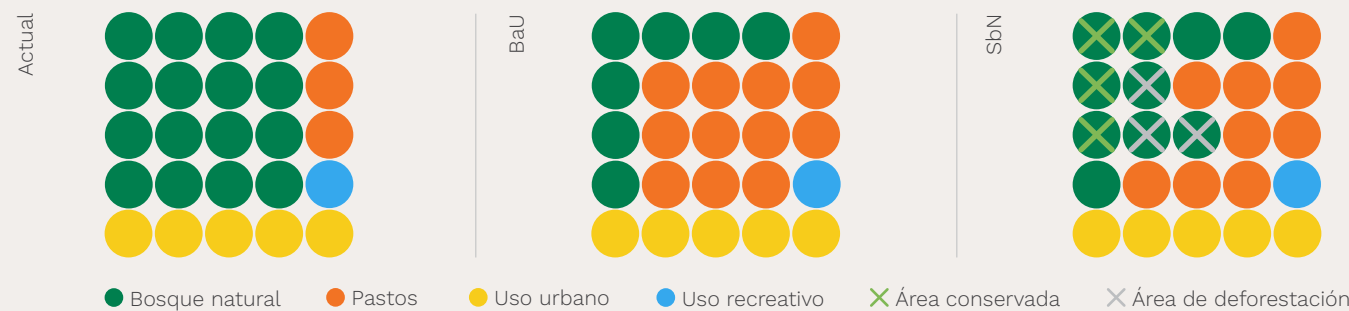
al implementar SbN, impidiendo o reduciendo la probabilidad de alcanzar el nivel de deforestación proyectado en el escenario BaU y, por ende, la liberación o emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Costo social del carbono} = \text{toneladas de carbono no emitidas por la deforestación evitada} \times \text{costo social del carbono por tonelada}$$

En el contexto de las inversiones en SbN, también se consideraron intervenciones de reforestación a través de varios métodos. Sin embargo, no se realizaron cálculos específicos sobre los incrementos en el carbono almacenado en la cuenca debido a esta reforestación. Los cálculos se han centrado exclusivamente en la deforestación evitada. Los costos asociados con la reforestación no se calcularon debido a la falta de información suficiente sobre los factores de emisión. No obstante, es importante destacar que este enfoque podría subestimar la estimación del costo evitado, lo que significa que se está siendo conservador en las proyecciones.

Para estimar las toneladas de carbono evitadas por la reducción de la deforestación en comparación con el escenario BaU, se utilizan los resultados de los modelos biofísicos, que proporcionan información sobre la extensión de bosques mantenidos en cada escenario de SbN. Este análisis implica comparar los píxeles de bosque en los escenarios actuales de diversas coberturas con los cambios observados en los escenarios de BaU y SbN (figura 17). El algoritmo identifica los píxeles que experimentan cambios en la cobertura, detectando así los casos de deforestación, para luego compararlos con los escenarios de SbN destinados a la conservación.

**Figura 17.** Proceso del modelo biofísico para encontrar las hectáreas de bosque mantenidas por la implementación de SbN



Fuente: N4W (2024).

Los resultados de las hectáreas de bosque mantenidas se convierten en el total de carbono almacenado que se evita liberar, utilizando un factor de emisión de 478 tCO<sub>2</sub>e ha<sup>-1</sup>. Este factor es empleado actualmente por CuencaVerde para estimar las existencias de carbono en la biomasa de los árboles (CuencaVerde, 2022).

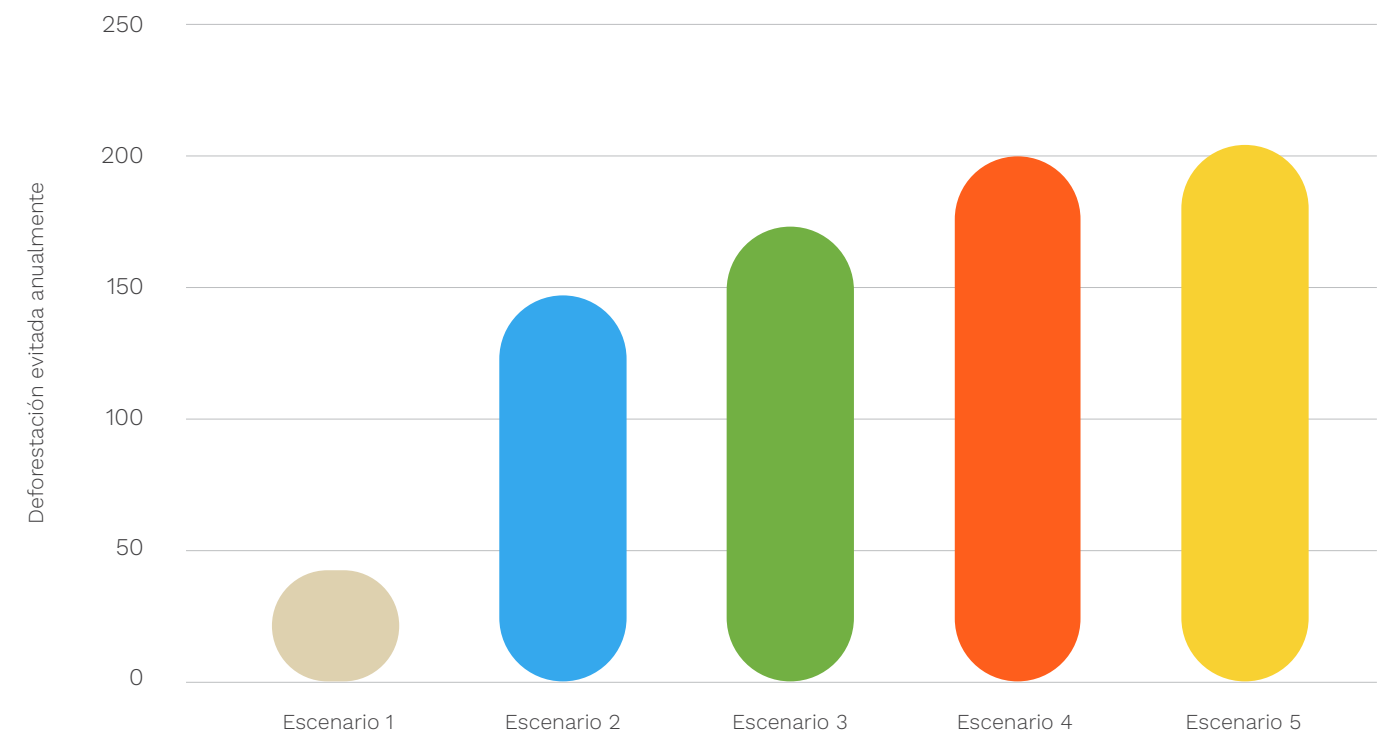
Las toneladas de carbono almacenado evitado se multiplican por el costo social del carbono. Este factor presenta importantes variaciones en la literatura, por lo que para este análisis se toman dos referentes: el valor económico asociado al impacto global de emitir una tonelada de CO<sub>2</sub>, de 185 USD/ton (Rennert et al., 2022), y el valor económico asocia-

do a una tonelada emitida desde América Latina, 25,83 USD/ton (Alatorre et al., 2019). Ambos valores fueron ajustados a valor presente utilizando la inflación hasta el 2024.

## Resultados

En la figura 18 se visualizan las hectáreas de bosque cuya deforestación se espera evitar en la cuenca del río Grande. Además de los beneficios para la salud del hábitat y la población, en la figura 20 se presenta el impacto económico de esta reducción de la deforestación, diferenciando entre el resultado obtenido con el uso del factor global y el regional mencionado anteriormente.

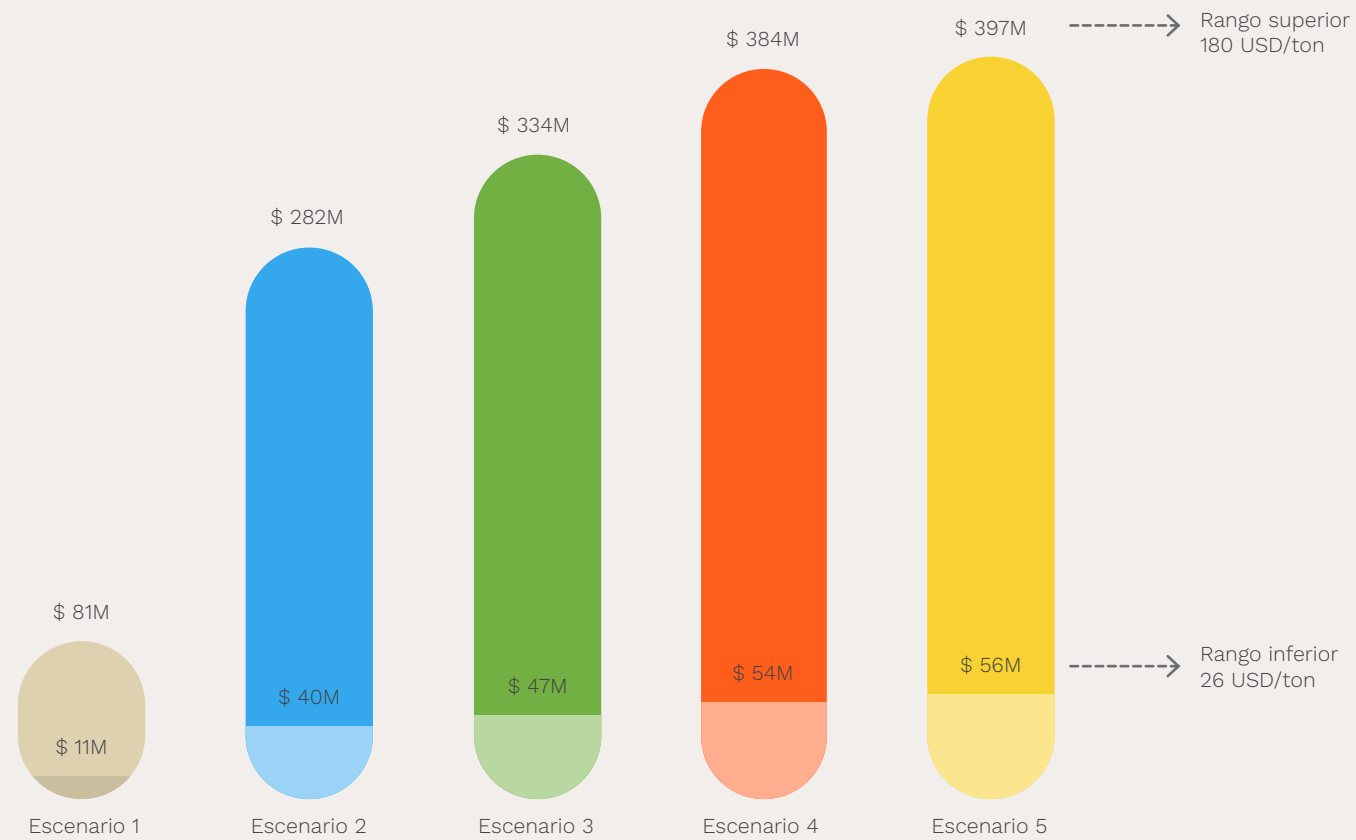
**Figura 18.** Deforestación evitada por la implementación del portafolio de SbN (ha/año)



Fuente: N4W (2024).



**Figura 19.** Costo social del carbono evitado por deforestación evitada por la implementación del portafolio de SbN (VPN para el rango superior e inferior del análisis)



Fuente: N4W (2024).

El costo social del carbono (CSC) es un concepto crucial para evaluar el impacto económico, social y ambiental del cambio climático, ya que representa el daño económico causado por la emisión de una tonelada adicional de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. En este contexto, las SbN desempeñan un papel importante al generar múltiples beneficios, no solo para el agua, sino también para otros aspectos.

Estas soluciones no solo proporcionan servicios ecosistémicos valiosos, como la purificación del agua, la protección contra inundaciones y la mejora de la biodiversidad, sino

que también ayudan a mitigar el cambio climático al mantener el suelo y capturar carbono de la atmósfera. En resumen, reconocer el valor de las SbN y su capacidad para generar beneficios múltiples es esencial para abordar los desafíos del cambio climático desde una perspectiva económica y ambiental. Al considerar el CSC y los beneficios de la SbN, podemos tomar decisiones informadas para un futuro más sostenible.

Para más información acerca de la metodología y los resultados del costo social del carbono, consulte el Apéndice D. Manejo de sedimentos del embalse Riogrande.

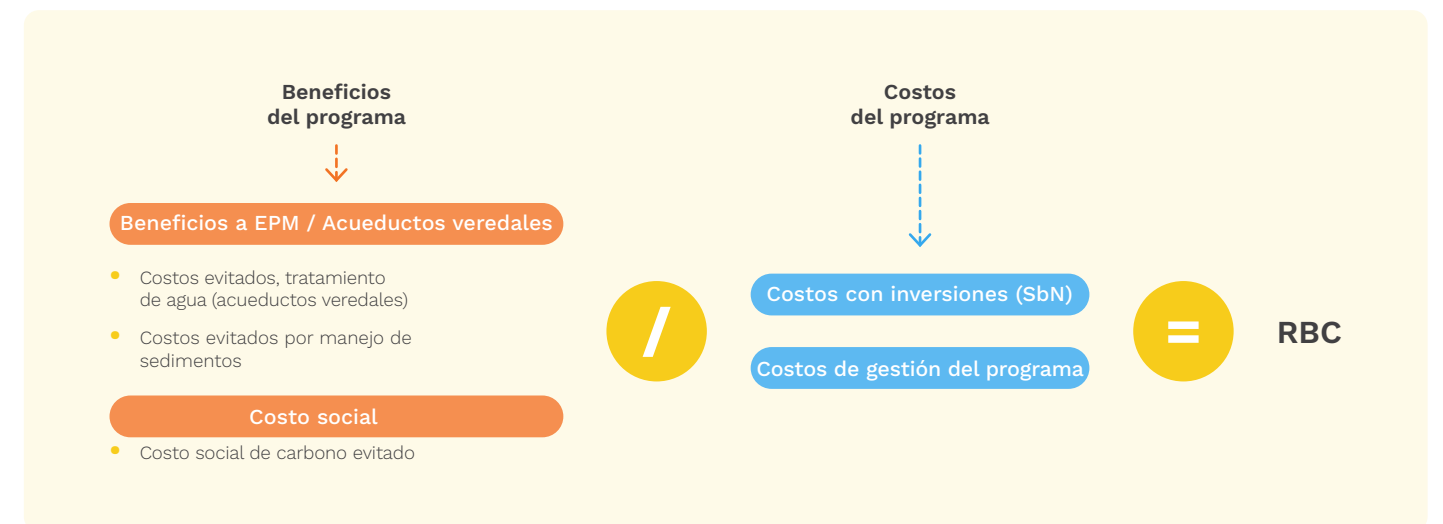
## Paso 2.5 Tasa de descuento

Se emplea la tasa social de descuento propuesta por el Departamento Nacional de Planeación (Resolución 1092 de 2022) para proyectos con un horizonte temporal de 30 años (3,5%). Esta tasa es recomendada para evaluar socialmente proyectos de inversión pública. Se caracteriza por ser relativamente baja y se adecua a retornos a largo plazo, como los ambientales. Esto permite reflejar el alto valor social asociado a los beneficios futuros de este tipo de proyectos.

### Resultados generales de la relación beneficio-costos

A modo resumen, en la figura 20 se visualiza el proceso y los datos considerados para obtener el cálculo de la relación beneficio-costos (RBC) para los cinco escenarios de implementación del portafolio de SbN de CuencaVerde, considerando tanto los costos como los beneficios.

**Figura 20.** Resumen del desarrollo del análisis de la relación beneficio-costos



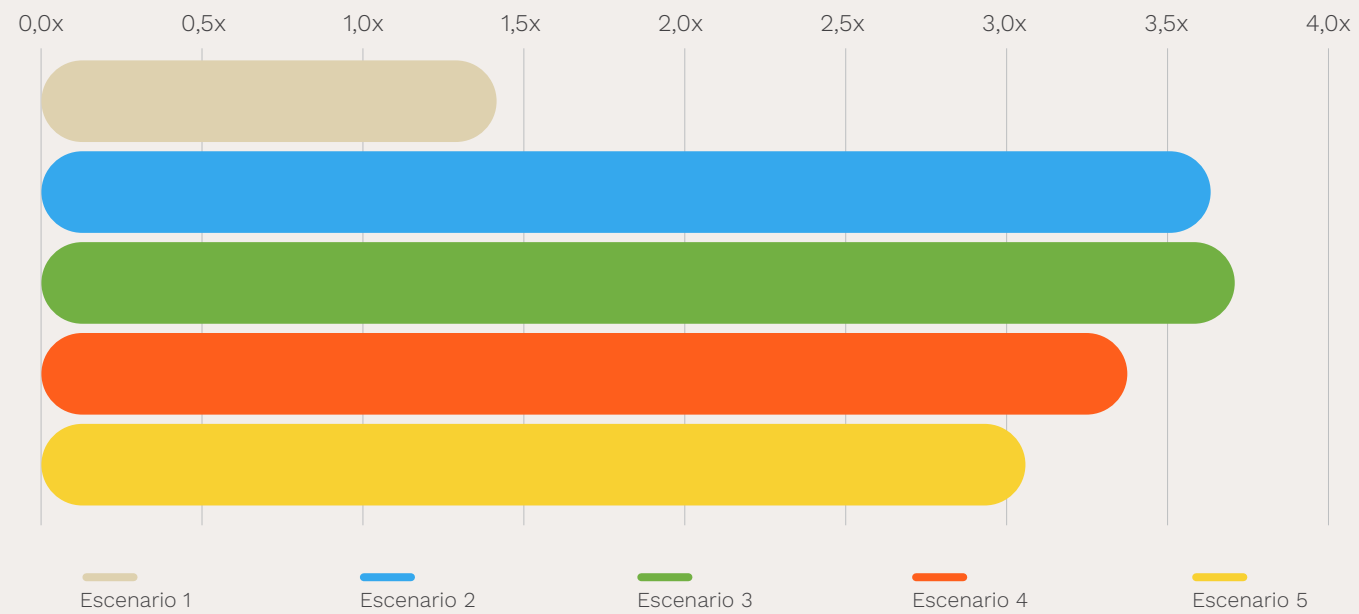
Fuente: N4W (2024).

Para el caso base de la RBC, se consideró el valor económico asociado al impacto en América Latina de emitir una tonelada de CO<sub>2</sub> de USD 26 ajustado al 2024 (USD 32) (Alatorre et al., 2019). Los resultados se presentan en la figura 21. Adicionalmente, se realizó el cálculo del

costo social del carbono utilizando el valor económico asociado al daño global de emitir una tonelada de CO<sub>2</sub> (Rennert et al., 2022). Los resultados se encuentran en el anexo y, como era de esperar, este valor aumentaría sustancialmente los valores de la RBC.

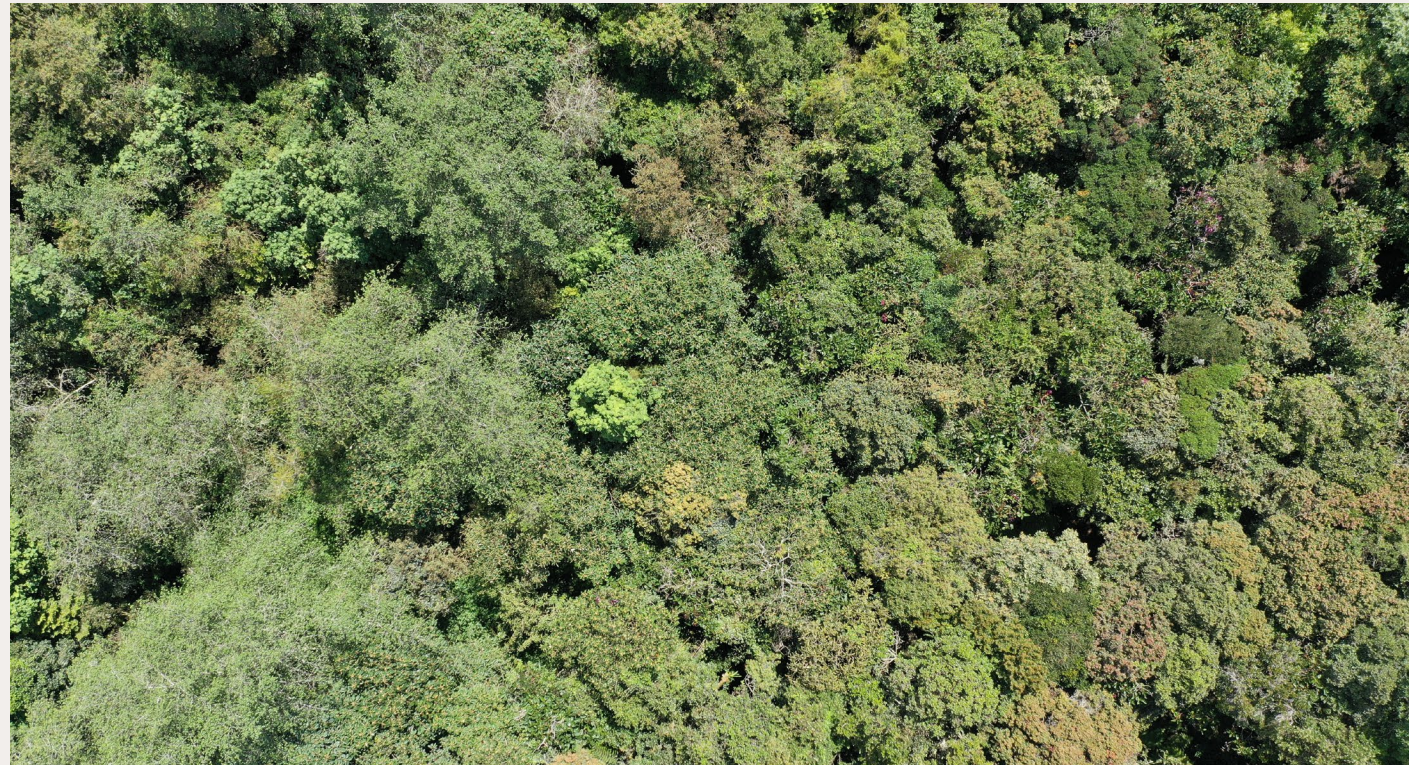


**Figura 21.** Relación beneficio-costo para los escenarios de inversión de Soluciones basadas en la Naturaleza, en la cuenca del río Grande



Fuente: N4W (2024).

→ Fuente: CuencaVerde.



A continuación, se destacan algunos puntos sobre los principales beneficios económicos:

**Costo social del carbono:** este indicador refleja los posibles impactos económicos de la emisión por tonelada adicional de dióxido de carbono equivalente a la atmósfera. Aunque no implica una transferencia monetaria directa, es sumamente relevante en el contexto de la crisis climática. Representa los costos que se evitarían al reducir los impactos del cambio climático, los cuales se espera que aumenten en Colombia según la Tercera Comunicación del Cambio Climático del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam, 2017). Estos impactos incluyen la seguridad alimentaria, los recursos hídricos, la biodiversidad, la salud, el hábitat humano y la infraestructura.

**Manejo de sedimentos:** el manejo adecuado de los sedimentos es otro beneficio clave. Las intervenciones de SbN ayudan a controlar la erosión y la sedimentación en la cuenca, protegiendo la calidad del agua y evitando la obstrucción de ríos y embalses. Dependiendo de la metodología de manejo de sedimentos adoptada, los valores de costos evitados pueden variar. Sin embargo, es importante concluir que, con la implementación de las SbN, los niveles de sedimentación que llegan al embalse son menores, posponiendo el momento en que EPM deberá gestionarlos entre 1 y 13 años según el escenario de intervención.

**Costos evitados de tratamiento de agua:** aunque los valores absolutos de los costos evitados de tratamiento de agua pueden no ser muy altos nominalmente, su proporción es relevante. Estos costos representan el ahorro en tratamientos de agua debido a la mejora de la calidad del agua en la cuenca. Los beneficios económicos generados son proporcionales a los costos operacionales de los acueductos, por lo que este beneficio será relevante para los actores en la cuenca.

En conjunto, estos beneficios demuestran la importancia de considerar las SbN como parte integral de las estrategias de inversión en la CuencaVerde. Al abordar los desafíos ambientales y económicos de manera holística, podemos lograr un desarrollo sostenible y resiliente para las generaciones futuras.

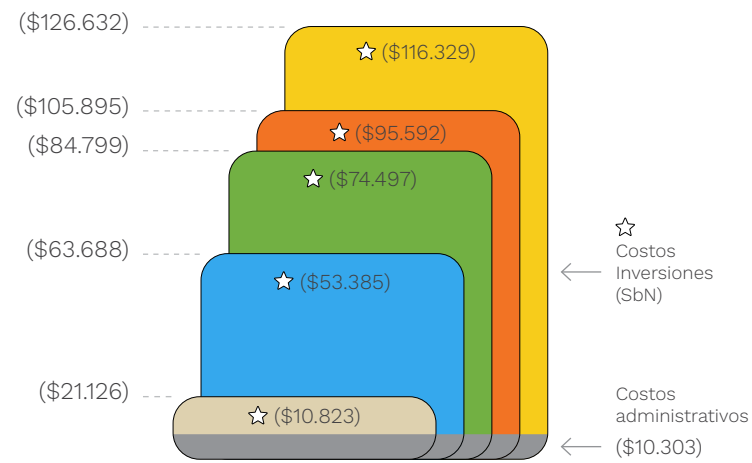
Como se observó en la figura 21, en todos los escenarios evaluados, el programa CuencaVerde exhibe una atractiva relación beneficio-costos a lo largo de un periodo de 30 años. Además, se recomienda explorar oportunidades para maximizar los ingresos durante la implementación del programa, como la comercialización de bonos de carbono. Un análisis preliminar del carbono adicional que podría capturarse gracias a las intervenciones sugiere un potencial de ingresos entre USD 35 millones y USD 130 millones en un periodo de 30 años.

A continuación, en la figura 22 se presentan los resultados totales de costos y beneficios para cada uno de los escenarios de inversión.

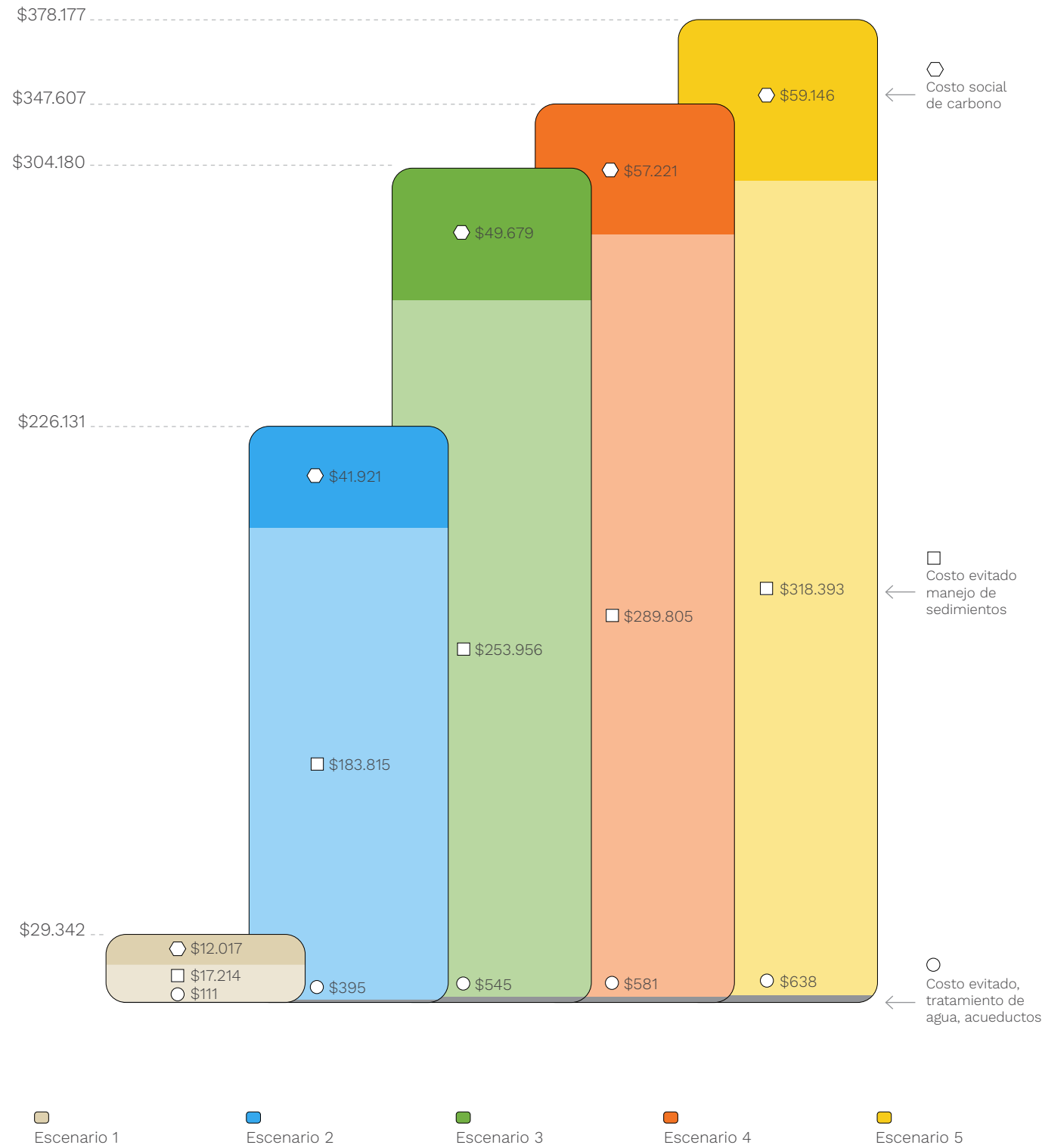


Figura 22. Costos y beneficios anuales amortizados a 30 años para los cinco escenarios de inversión

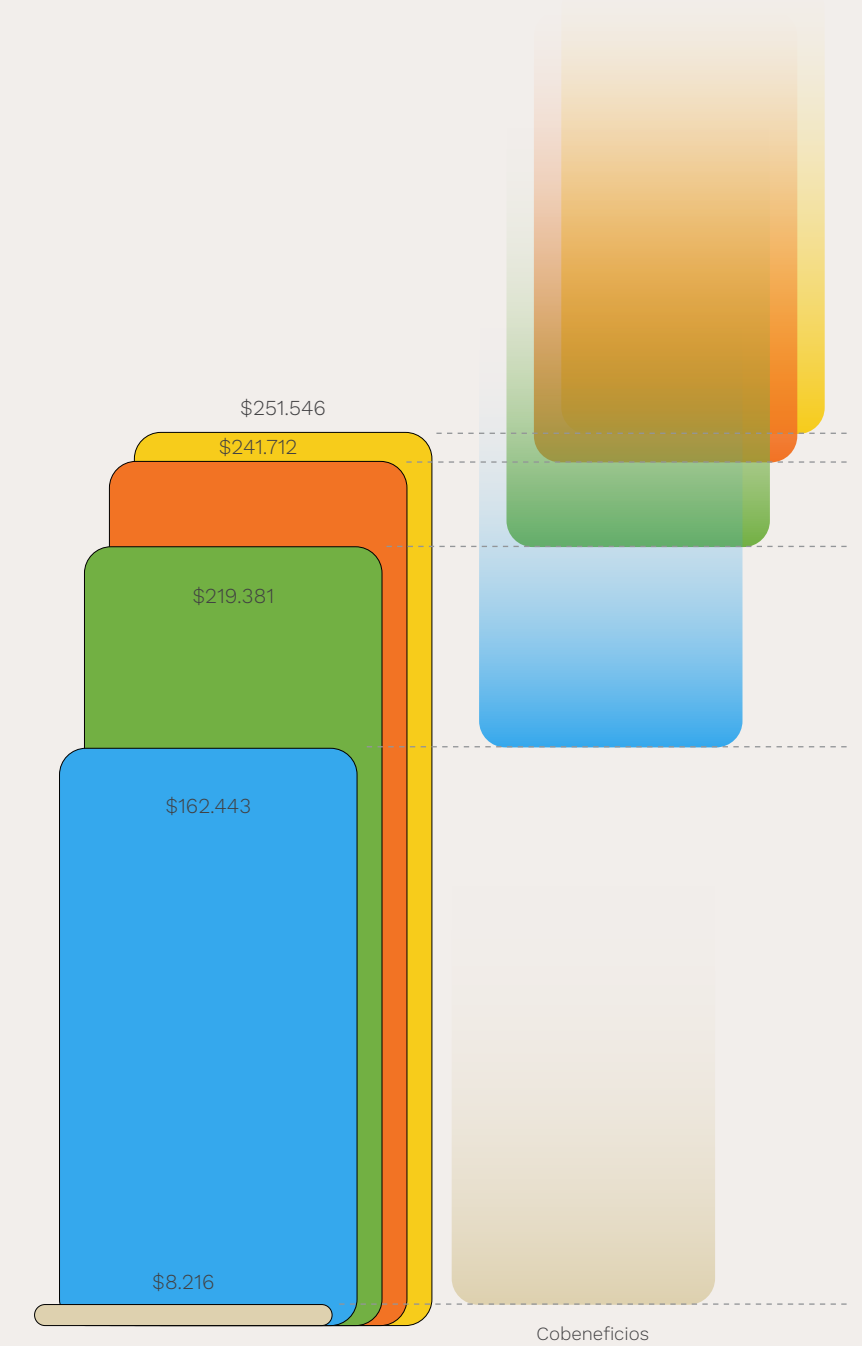
**Total costos de inversiones + costos administrativos**  
Miles de USD



**Total beneficios**  
Miles de USD



**Total beneficios (-) costos**  
Miles de USD





## Factores que influyen en la relación beneficio-costos (RBC)

**Cobeneficios:** la inclusión de cobeneficios no monetizados en el estudio de caso podría reflejar cambios significativos en la RBC. Para ello, se requieren metodologías y modelos especializados que permitan su cálculo preciso. El análisis detallado de estos cobeneficios dependerá del enfoque que se quiera adoptar.

**Disponibilidad de información:** la falta de acceso a información relevante ha excluido potenciales beneficios del análisis, como la mejora en la calidad del agua que podría apoyar la regulación de la población de cianobacterias, o la reducción de sedimentos en la planta de tratamiento de agua potable Manantiales. Esta planta es una de las más grandes de la cuenca y podría tener impactos económicos adicionales para EPM.

**Alcance geográfico:** el portafolio de SbN se propuso para toda el área de influencia de CuencaVerde, que incluye las cuencas de río Negro, río Grande y río Arma. Sin embargo, este estudio se limitó a la cuenca del río Grande. Ampliar el alcance geográfico podría generar cambios importantes en el análisis de la RBC.

**Actores beneficiados:** las instituciones incluidas en el análisis fueron aquellas con las que CuencaVerde ya tenía un proceso de trabajo previo o aquellas incluidas dentro del proceso con la CRA, por lo cual era posible acceder a la información. No obstante, hay otros acueductos veredales y actores en la cuenca, como la industria lechera y los agricultores,

que también se beneficiarían de la implementación de las SbN. Eso implica una posible subestimación de los beneficios.

**Tiempo:** la proyección para el análisis fue de 30 años para todos los factores, excepto para el análisis relacionado con la vida útil del embalse, que utilizó un horizonte de 45 años. Esta extensión se basó en el cálculo resultante para todos los escenarios, donde el año en el que se debe comenzar a manejar los sedimentos es igual o superior a 30 años.

**Cambio climático:** No se consideraron los efectos de temperatura y precipitación afectados por el cambio climático en este análisis. Sin embargo, ante las tendencias y eventos extremos previstos, la implementación de SbN puede contribuir en la resiliencia de la población y la mitigación de los efectos del cambio climático, como el aumento de temperaturas.

**Costo social del carbono:** para este análisis se consideró el rango inferior postulado para América Latina (32 USD/ton), el cual es el factor más conservador respecto al impacto económico de emitir una tonelada adicional de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Sin embargo, si se utilizara el costo social global del carbono, que es común en análisis regulatorios en muchos países (Kottchen, 2018) y propuesto por Rennert *et al.* (2022) (225 USD/ton), habría un aumento considerable en la relación beneficio costo.

## Cobeneficios

Las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) fortalecen los servicios y funciones de los ecosistemas, generando una amplia variedad de beneficios adicionales o cobeneficios que trascienden el enfoque específico de este caso de negocio. Estos cobeneficios pueden abarcar elementos ambientales, sociales y económicos y por ende ser de interés de distintos actores en la cuenca. La cuantificación precisa de estos cobeneficios requiere de estudios especializados que aborden cada aspecto y su alcance puede ser aún más amplio del descrito en la siguiente sección. Por lo tanto, aunque los cobeneficios mencionados a continuación no formaron parte del análisis de relación beneficio-costos, se consideró importante describirlos por su gran valor para diversos actores de la cuenca.

Para cada cobeneficio, se han agregado métricas alineadas con la Agenda Compartida de Conservación (ACC) de The Nature Conservancy (TNC). La ACC establece las áreas centrales de trabajo de la or-

ganización (cambio climático - mitigación y adaptación, océanos, sistemas hídricos y tierras saludables) y, por ende, guía nuestra agenda de trabajo 2023. Asociado a cada una de estas áreas, se establecen metas para evaluar el progreso de TNC. Por tanto, aunque estas métricas se asocian a metas internas de la organización, también pueden servir de guía para cualquier organización o institución que apoye la implementación de este portafolio y desee introducir metas organizacionales asociadas a la conservación o sostenibilidad de los ecosistemas.

Dado que se presentan varios escenarios y el propósito de este análisis no es determinar cuál es el mejor, sino mostrar su relación beneficio-costos, no se establecen metas asociadas a estas métricas. No obstante, una vez definido el escenario de inversión para la cuenca, será beneficioso establecer metas ajustadas y revisar periódicamente las métricas para garantizar que reflejen su progreso a lo largo del tiempo.



## Biodiversidad

La preservación de la biodiversidad es crucial para controlar y equilibrar los cambios en el uso del suelo, considerados como uno de los principales motores de cambio y pérdida de biodiversidad en los últimos 50 años (Plataforma Intergubernamental de Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos [IPBES], 2019). En

la cuantificación del componente de biodiversidad, se implementó el modelo InVEST de calidad de hábitat, el cual considera factores como la vegetación, la biodiversidad y las perturbaciones antropogénicas. Las modelaciones desarrolladas se enfocan en los escenarios mencionados anteriormente.

**“La calidad del hábitat se define como la capacidad de un entorno específico para proveer las condiciones necesarias que permitan la supervivencia y reproducción de una especie determinada. Esto abarca aspectos como la disponibilidad de alimento, agua, refugio, espacio para desplazarse y la ausencia de amenazas como depredadores o enfermedades”. (Hall et al., 1997).**

Por tanto, un hábitat de alta calidad está en un estado relativamente intacto, manteniendo su estructura y su función dentro de la variabilidad histórica. La calidad del hábitat está influenciada por la cercanía a actividades humanas en el suelo y la intensidad de dichas actividades. Generalmente, se observa una degradación en la calidad del hábitat a medida que aumenta la intensidad de los usos del suelo cercanos.

Las SbN pueden tener un impacto positivo en términos de calidad del hábitat. La restauración de bosques o coberturas naturales aumenta la disponibilidad de refugio y alimento para diversas especies, mejora la calidad del agua y reduce la erosión

del suelo. Estos ambientes restaurados proporcionan espacios seguros para que las especies se desplacen, se alimenten y se reproduzcan, incrementando su supervivencia (Kabisch et al., 2017). Además, las SbN pueden reducir el impacto de las actividades humanas al crear barreras naturales entre las zonas industriales o urbanas y los hábitats sensibles. Esto disminuye las amenazas directas, como la contaminación o el ruido, que pueden afectar negativamente a las especies locales (Kabisch et al., 2017).

Para más detalle de la modelación, consulte el Apéndice B. Análisis biofísico SbN – CuencaVerde.



→ Fuente: CuencaVerde.

## Resultados

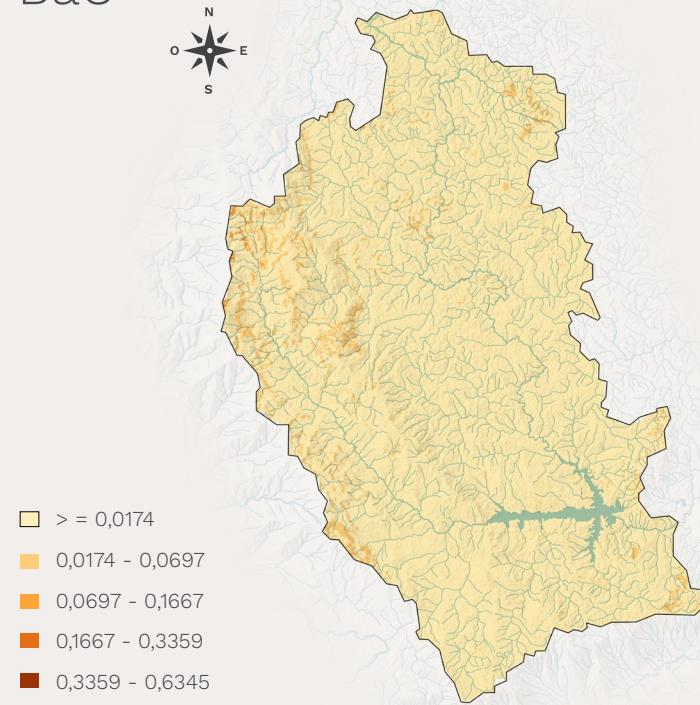
Los resultados del modelo de calidad de hábitat para la cuenca evidencian que, a medida que se aumentan las inversiones en SbN, existe un incremento en la calidad del hábitat de la cuenca, especialmente en los escenarios de inversión 4 y 5. Este aumento de la calidad del hábitat se traduce en una mayor capacidad del entorno para garantizar condiciones de supervivencia y reproducción de las especies. Esta capacidad es de vi-

tal importancia para mantener el equilibrio ecosistémico de la región y apoya los procesos que lleva a cabo CuencaVerde, los cuales se relacionan con el monitoreo de la biodiversidad y con el establecimiento de corredores de conservación asociados a los objetos de conservación priorizados por la corporación: 1) *Leopardus trigrinus* (tigrillo lanudo) y 2) *Atlapetes blancae* (montañerito paisa), que se encuentran en categoría de amenaza global vulnerable y en peligro crítico, respectivamente.

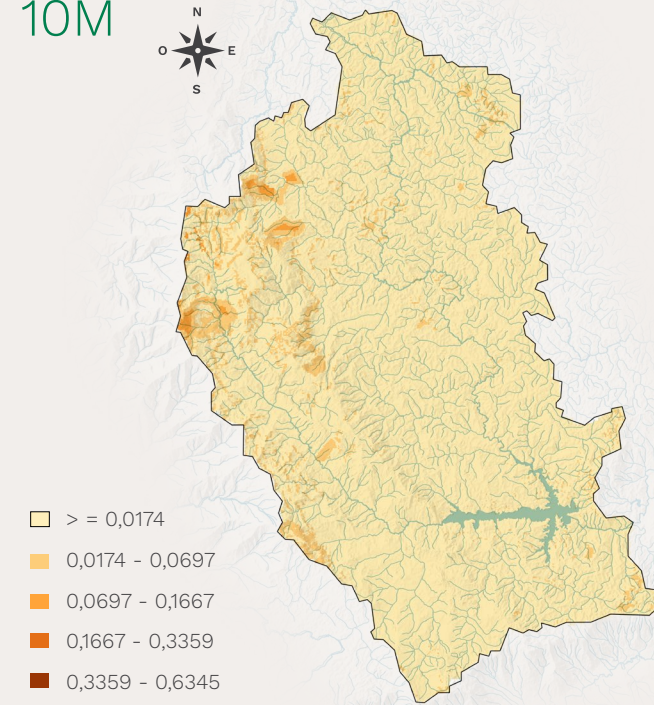


Figura 23. Resultados de almacenamiento de calidad del hábitat de la cuenca de los ríos Grande y Chico

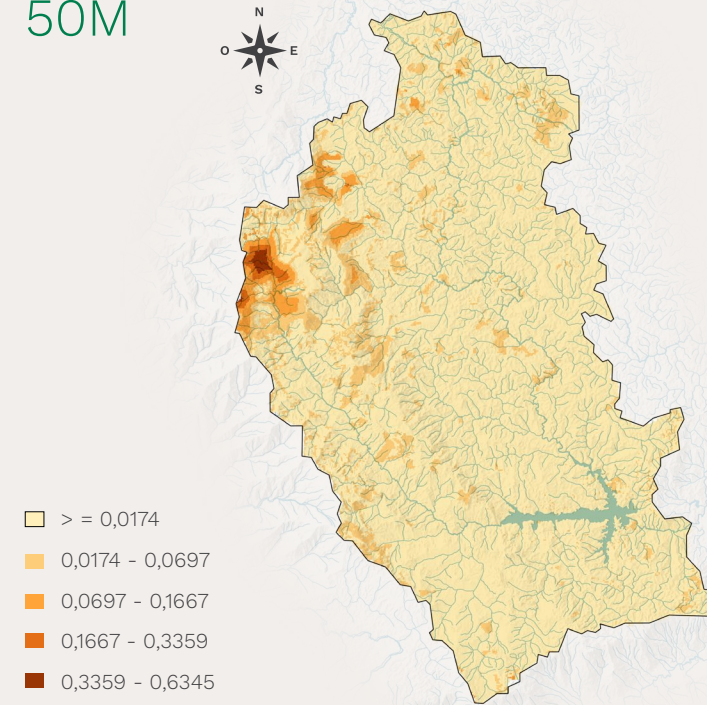
BaU



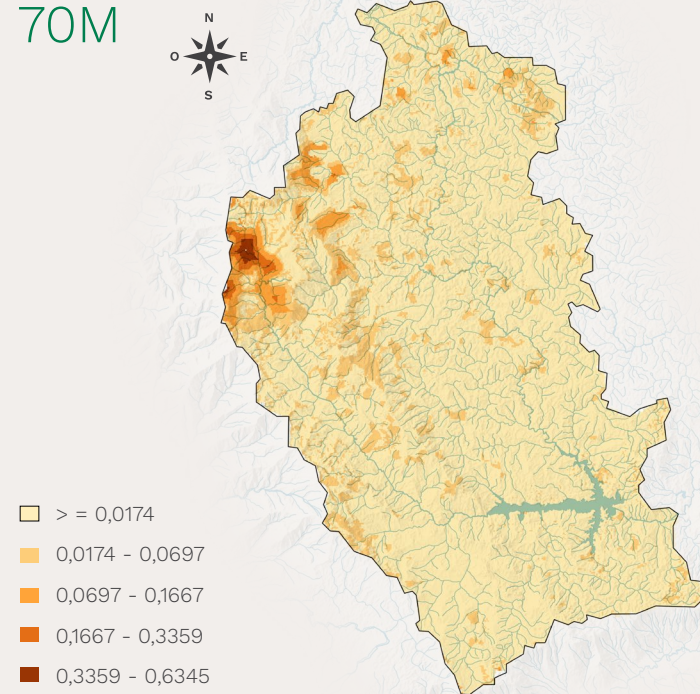
Escenario 1  
10M



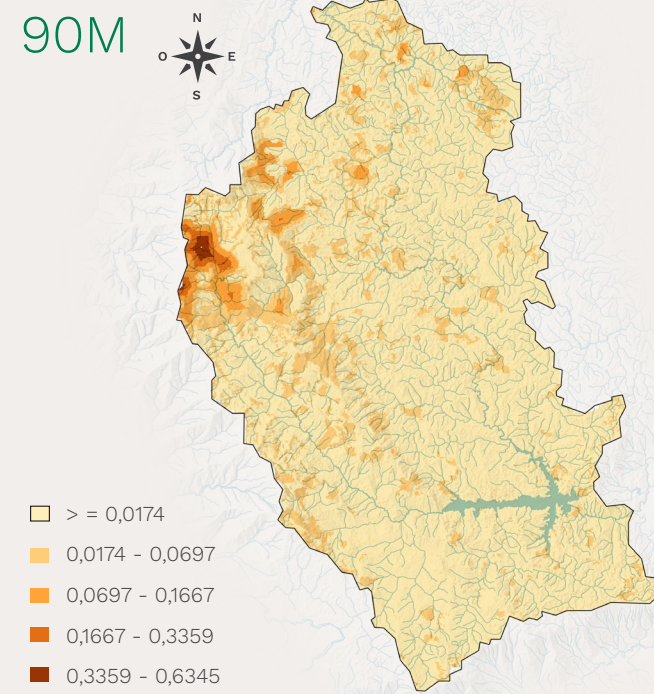
Escenario 2  
50M



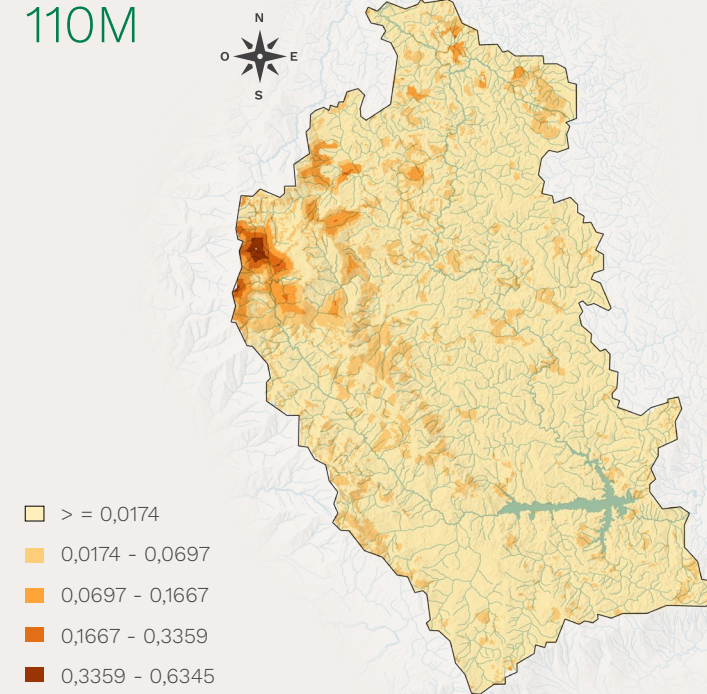
Escenario 3  
70M



Escenario 4  
90M



Escenario 5  
110M



Métricas asociadas:



Categoría  
Tierras saludables

Área terrestre con mejor manejo (ha)

Tierras en riesgo con conversión evitada (ha)



## Salud

La implementación de SbN puede mejorar significativamente la calidad del agua en las cuencas, generando numerosos beneficios para sus habitantes. Uno de estos beneficios es la reducción de enfermedades transmitidas por el agua, como las enfermedades diarreicas agudas (EDA). La contaminación por coliformes fecales está vinculada con la morbilidad por EDA, afectando la salud, la economía y aumentando el riesgo de mortalidad, especialmente en niños menores de 5 años. Aunque se reconoce que los municipios están adoptando medidas para aumentar la cobertura de servicios públicos de agua y saneamiento, en la cuenca del río Grande, el 49 % de la población rural y el 20 % de la población urbana no cuenta con ac-

ceso a agua potable (Departamento Administrativo de Planeación, 2019), lo que incrementa el riesgo de EDA.

En Antioquia, se reportan 74,2 casos de EDA por cada 1.000 habitantes (Instituto Nacional de Salud, 2018). Por consiguiente, una disminución de los coliformes en el suministro de agua para comunidades sin acceso a agua potable debería resultar en una reducción de los casos de EDA en estas poblaciones. Los resultados de la modelación hidrológica respaldan esta afirmación, mostrando que a medida que aumentan las inversiones en SbN, disminuye el porcentaje de coliformes en el agua. Este análisis se llevó a cabo en los municipios de San Pedro de los Milagros, Belmira y Entrerriós (figura 24).

Esta reducción de coliformes en el agua no solo promovería la salud de la población, sino que también disminuiría los costos asociados al tratamiento de la enfermedad. Se estima que el 70 % de los afectados por EDA requiere atención médica urgente, con un costo aproximado de 218.990,24 COP por persona (Jiménez y Reyes, 2020). Además, el 5 % de los enfermos necesita hospitalización, en promedio por 3,5 días,

con un costo diario por persona estimado de \$1.001.798,13 COP (Restrepo et al., 2009). En este sentido, el beneficio económico en costos ahorrados por la atención médica de estas enfermedades estaría entre 20.000 USD en VPN y 210.000 USD, según el escenario de intervención elegido, con un mayor impacto en los municipios de San Pedro de los Milagros, Belmira y, finalmente, Entrerriós.

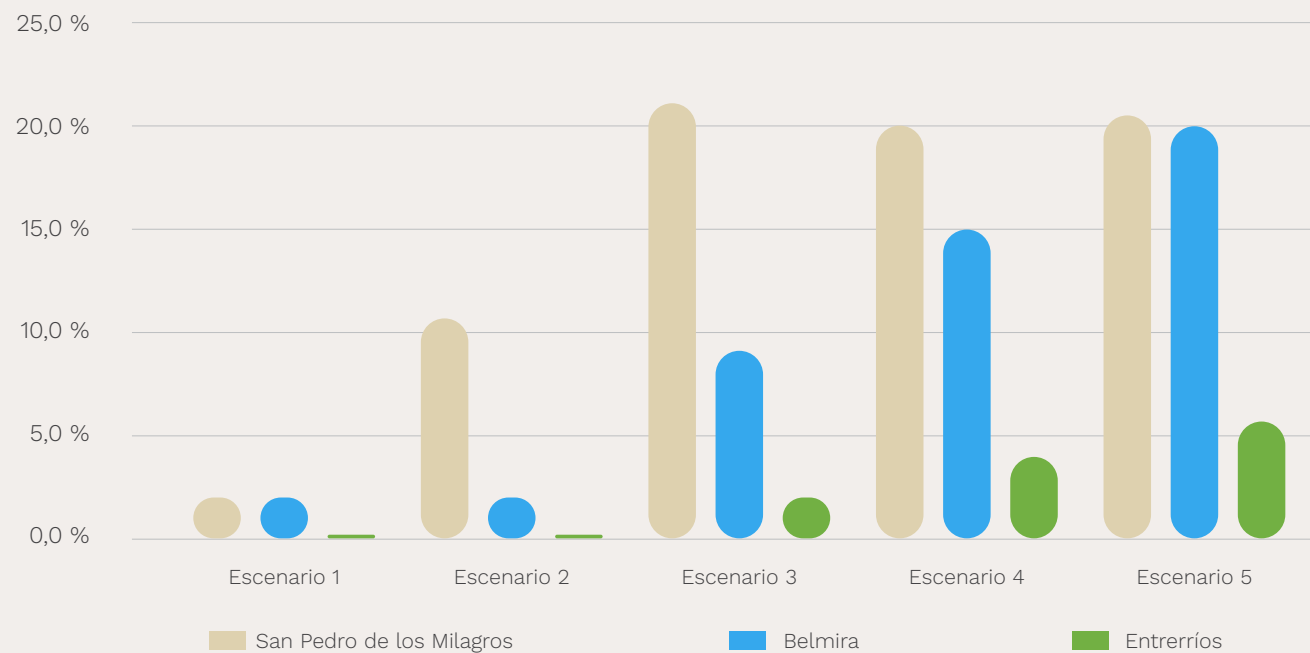
### Métricas asociadas:



Categoría  
**Salud**

Reducción de coliformes totales en el agua

**Figura 24.** Valor promedio de disminución en los coliformes en el agua (Belmira, San Pedro de los Milagros y Entrerriós)



Fuente: N4W (2024).

→ Fuente: CuencaVerde.







→ Fuente: CuencaVerde.

## Productividad agrícola

La producción de leche tiene una gran importancia económica y social en la cuenca. En 2017, representaba el 12 % del producto interno bruto (PIB) del sector agropecuario y generaba el 20 % de los empleos en este sector. En el altiplano norte de Antioquia, que coincide con la cuenca del río Grande, esto representaba 12.849 empleos permanentes (Ministerio de Agricultura, 2020). Además, la producción de leche de esta zona corresponde al 70 % de toda Antioquia (Corantioquia,

2016), con los municipios de Santa Rosa de Osos (1.299.960 l/día), San Pedro de los Milagros (890.427 l/día) y Don Matías (690.000 l/día) generando la mayor producción de leche en el departamento (Gobernación de Antioquia, 2023).

La implementación de SbN relacionadas con la mejora de las prácticas ganaderas ha demostrado que puede generar una ganadería más eficiente. Esto se logra al reducir las emisiones de gases de efecto invernade-

ro (GEI), disminuir la vulnerabilidad de los productores frente al cambio climático y aumentar la producción de leche y carne por animal. Estas prácticas generan un aumento en la oferta de forrajes, una mejora en los atributos nutricionales del forraje y se benefician de una reducción de la temperatura e irradiación solar en las zonas de pastoreo de los bovinos, lo que se traduce en un mayor bienestar para los animales (Banco Mundial et al., 2021).

Un análisis de ganadería sostenible en Colombia, con énfasis en la región de la Orinoquía, evaluó el impacto de cinco sistemas silvopastoriles diseñados para mejorar la actividad ganadera hacia una más sostenible y competitiva (Banco Mundial, 2021). Estos sistemas incluyeron arreglos de árboles dispersos, cercas vivas, setos forrajeros y bancos mixtos de forraje y ramoneo. Actividades similares son implementadas por CuencaVerde

como parte de sus SbN de mejores prácticas ganaderas. El análisis mostró un impacto positivo en la capacidad de carga, la tasa de natalidad, la producción de leche, el peso de los bovinos y la reducción de costos en la producción.

En cuanto a la productividad de leche, los resultados específicos mostraron un aumento del 9,9 % para los sistemas silvopastoriles con árboles dispersos, un 15,2 % para las cercas vivas y un aumento de hasta el 111 % para los sistemas silvopastoriles intensos (Banco Mundial, 2021). Estos resultados demuestran que, a pesar de los múltiples factores que pueden afectar los resultados debido a las distintas regiones, la productividad lechera se vería beneficiada con la implementación de buenas prácticas ganaderas en la cuenca, teniendo efectos significativos para la economía de los municipios y a nivel de cada finca productora.

### Métricas asociadas:



Categoría  
**Comunidades**

Personas con mayores oportunidades económicas sostenibles basadas en el lugar



## Adaptación ante eventos climáticos

La implementación de SbN contribuye a la gestión del riesgo, especialmente en la reducción del riesgo de inundaciones. Los resultados hidrológicos indican que, a medida que se incrementan las inversiones en SbN, disminuyen los caudales asociados a eventos extremos, que suelen ocurrir con alta intensidad y en un corto periodo de tiempo. La deforestación en la cuenca se asocia con un aumento en la intensidad de las inundaciones, mientras que los movimientos en masa están relacionados con lluvias intensas y prolongadas, erosión, modificación del drenaje natural y pérdida de la cobertura vegetal (Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático [Idiger], 2023).

Este hallazgo es particularmente relevante considerando que, según el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca de los ríos Grande y Chico (POMCA), una parte considerable de la población rural enfrenta una alta vulnerabilidad a inundaciones y movimientos en masa, con aproximadamente 15.000 hectáreas en riesgo alto de inundación y 7.000 hectáreas amenazadas por movimientos en masa (Corantioquia, 2015).

Estos eventos extremos generan múltiples externalidades. Por ejemplo, el suministro de agua potable se ve especialmente afectado en el municipio de Belmira, vinculado al acueducto de Empubel, debido a la alta susceptibilidad de las quebradas Mogote y Montañita a movimientos en masa (Corantioquia, 2015).

### Métricas asociadas:



Categoría  
**Agua dulce saludable** →

Ecosistemas de agua dulce con mejor manejo (ha)

Ecosistemas de agua dulce en riesgo con conversión evitada (ha)



Categoría  
**Adaptación climática** →

Personas en la comunidad que se benefician de la adaptación climática





# Conclusiones

El caso de negocio demuestra que el portafolio de SbN priorizado por CuencaVerde presenta una atractiva relación beneficio-costo en todos los escenarios analizados a lo largo de 30 años, fluctuando entre 1,4 y 3,6, según el escenario de inversión y usando un valor conservador del costo social del carbono. Estos hallazgos confirman la relevancia de las SbN para abordar temas de calidad de agua en la cuenca del río Grande.

Asimismo, el caso de negocio respalda la viabilidad del programa y señala un impacto económico positivo al mejorar la calidad del agua de la cuenca. Al mismo tiempo, desempeña un papel fundamental en la mitigación de los efectos adversos del cambio climático en la región.

Por tanto, es claro el rol clave que pueden cumplir los Fondos de Agua, como CuencaVerde, en llevar estas intervenciones a la acción.

Considerando las oportunidades presentadas por la Resolución CRA 907 de 2019 y reconociendo que el impacto de las SbN está directamente relacionado con la escala de su implementación, se alienta a las empresas de servicios del sector de agua potable y saneamiento a aplicar las inversiones ambientales adicionales para la protección de cuencas y fuentes de agua habilitadas por la resolución. Estos mecanismos tarifarios representan una de las oportunidades más innovadoras y sostenibles para contribuir con la implementación de portafolios de SbN a escala.

Se espera que el presente caso de negocio contribuya al diálogo y a la toma de decisiones respecto al alcance que la Resolución 907 otorga a la protección de cuencas y sus fuentes de agua. Se procura ampliar su enfoque para abordar las problemáticas específicas de cada cuenca, asociadas a sus diferentes usos y coberturas, que están directamente relacionadas con los problemas de seguridad hídrica que se buscan resolver.

Además, se alienta a los prestadores de agua a trabajar de manera colectiva, en conjunto con el sector privado y la sociedad civil, bajo una visión de cuenca mediante los mecanismos que habilitan los Fondos de Agua. Esta colaboración contribuirá a la inversión en programas de SbN

que prioricen intervenciones basadas en las mayores contribuciones netas que puedan brindar a la cuenca, y no a un actor en particular. En el caso de la cuenca del río Grande, se considera estratégico motivar el involucramiento del sector ganadero, que tiene un rol importante en la economía de la cuenca, y además puede beneficiarse en términos de productividad lechera.

Con miras al futuro, se recomienda explorar la comercialización de bonos de carbono para maximizar los ingresos durante la implementación del programa. Un análisis preliminar del carbono adicional que podrían capturar las intervenciones sugiere un potencial de ingresos entre los USD 35 millones y USD 130 millones.



# Referencias

- Alatorre, J. E., Caballero, K., Ferrer, J. y Galindo, L. (2019). *El costo social del carbono: una visión agregada desde América Latina*. CEPAL.
- Banco Mundial. (2021). *Compendio del estado del arte de la ganadería sostenible en Colombia con énfasis en la región de la Orinoquía*. Banco Mundial.
- Banco Mundial, Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (CIPAV), Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Federación Colombiana de Ganaderos (Fedegán), Fondo Acción para el Ambiente y la Niñez y The Nature Conservancy (TNC). (2021). *Acción de Mitigación Nacionalmente Apropiada NAMA: de la ganadería bovina sostenible en Colombia*. Banco Mundial.
- Cataño-Álvarez, S. y Vélez-Upegui, J. (2016). Modelo conceptual agregado de transporte de sedimentos para cuencas de montaña en Antioquia - Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (39), 38-48. <https://doi.org/10.15446/rbct.n39.52888>
- Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (Corantioquia). (2015). *Actualización y ajuste. Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca de los ríos Grande y Chico*. Corantioquia.
- Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (Corantioquia). (2016). *Manual de producción y consumo sostenible. Finca lecheras*. Corantioquia.
- CuencaVerde. (2022). *Memoria Técnica Calculadora de Carbono*. CuencaVerde.
- Departamento Administrativo de Planeación. (2019). *Cobertura residencial de acueducto (%) en los municipios de Antioquia Por area. Año 2019*. Departamento Administrativo de Planeación.
- Global Green Growth Institute (GGGI). (2023). *Análisis de escenarios para la incorporación en la tarifa de acueducto*. GGGI.
- Gobernación de Antioquia. (2023). *Anuario estadístico del sector agropecuario del departamento de Antioquia 2022*. Gobernación de Antioquia.
- Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (Idiger). (2023). *Caracterización General del Escenario de Riesgo por Movimientos en Masa en Bogotá* <https://www.idiger.gov.co/rmovmasa>
- Instituto Nacional de Salud. (2018). *Enfermedad Diarreica Aguda (EDA), Colombia, 2018*. INS.
- Plataforma Intergubernamental de Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos (IPBES). (2019). *Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental*. IPBES. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3553579>
- Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC). (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. IPCC.
- Jiménez, J. y Reyes, S. (2020). *Costos de atención de triage IV y V en urgencias de un Hospital Universitario en Bogotá en el año 2019* [tesis de maestría, Pontificia Universidad Javeriana]. Repositorio Institucional Javeriano. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.10554.53170>
- Jiménez, M., Usma, C., Posada, D., Ramírez, J., Rogéliz, C.A., Nogales, J. y Spiro-Larrea, E. (2023). Planning and Evaluating Nature-Based Solutions for Watershed Investment Programs with a SMART Perspective Using a Distributed Modeling Tool. *Water*, 15(19), 3388. <https://doi.org/10.3390/w15193388>
- Kabisch, N., Korn, H., Stadler, J. y Bonn, A. (2017). *Nature-based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas. Linkages between Science, Policy and Practice*. Springer.
- Mazo, D., Ramírez, J. y Díaz, A. (2015). Caracterización física y química del embalse Riogrande II (Antioquia), Colombia. *Actualidades Biológicas*, 37(103), 155-168.
- Ministerio de Agricultura. (2020). *Cadena láctea colombiana*. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.
- Miralles-Wilhelm, F., Sanchez-Maldonado, R y Muñoz-Castillo, R. (2022). Assessing Water Security Through a Set of Consistent Metrics and Application to Water Funds in Latin America. *Current Trends in Civil & Structural Engineering*, 9(1), 1-16. <https://doi.org/10.33552/CTC-SE.2022.09.000704>
- Nature for Water Facility (N4W). (2024). *Configuración, calibración y validación del modelo SIGA-CAL. Estudio de caso CuencaVerde*. N4W.
- Padilla, O., Pérez, P., Cruz, M., Huilca-maigua, S. y Astudillo, S. (2015). Utilización de autómatas celulares como técnica de modelamiento espacial para determinación el cambio de uso de suelo y cobertura vegetal. *Ciencias Espaciales*, 8(1), 310-326. <https://doi.org/10.5377/ce.v8i1.2055>
- Rennert, K., Errickson, F., Prest, B., Rennels, L., Newell, R., Pizer, W., Kingdon, C., Wingenroth, J., Cooke, R., Parthum, B., Smith, D., Cromar, K., Diaz, D., Moore, F. C., Müller, U. K., Plevin, R. J., Raftery, A. E., Ševčíková, H., Sheets, H., Stock, J. H., ... Anthoff, D. (2022). Comprehensive evidence implies a higher social cost of CO<sub>2</sub>. *Nature*, 610(7933), 687-692. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05224-9>
- Restrepo, C., Echavarría, J., Manrique, R. y Valencia, J. E. (2009). Costo de hospitalización domiciliaria como alternativa de la hospitalización institucional: Periodo enero-diciembre de 2007. *CES Medicina*, 23(1), 27-35.
- Rogéliz, C., Vigerstol, K., Galindo, P., Nogales, J., Raeppe, J., Delgado, J., Piragauta, E. y González, L. (2022). WaterProof—A Web-Based System to Provide Rapid ROI Calculation and Early Indication of a Preferred Portfolio of Nature-Based Solutions in Watersheds. *Water*, 14(21), 3447. <https://doi.org/10.3390/w14213447>
- Western Dredging Association (WEDA). (2021). *Reservoir dredging: A practical overview*. WEDA.



# Apéndices



**Apéndice A.** Memoria de cálculo



**Apéndice B.** Análisis biofísico SbN - CuencaVerde



**Apéndice C.** Monetización de los beneficios para los acueductos veredales



**Apéndice D.** Manejo de sedimentos del embalse Riogrande



**Apéndice E.** Monetización del costo social del carbono



**Apéndice F.** Beneficio adicional - Bonos de carbono







**Débora Miranda**  
Debora.miranda@tnc.org

**Miguel Cañón**  
Miguel.canon@tnc.org

**María Camila Moreno**  
Maria.moreno@tnc.org

**Diana Madrigal**  
Diana.madrigal@tnc.org