

## Disminución de la contaminación en la cuenca alta del río Cauca con Soluciones Basadas en la Naturaleza

### Pollution Reduction in the Upper Cauca River Basin through Nature-based Solutions

Daniel Ascúntar-Ríos<sup>1</sup>   Carlos A. Madera-Parra<sup>1</sup>  Andrés F. Toro-Vélez<sup>1</sup>  Valentina Benítez-Sepúlveda<sup>1</sup>  Mario A. Gandini-Ayerbe<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Universidad del Valle, Santiago de Cali, Valle del Cauca, Colombia.

<sup>2</sup> Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Valle del Cauca, Colombia.

## Resumen

**Introducción:** La contaminación puntual y difusa (CPyD) asociada a micro-contaminantes en el agua amenaza la biodiversidad y la seguridad hídrica en Colombia, especialmente en la cuenca alta del río Cauca. La Universidad del Valle lidera un proyecto para mitigar esta problemática mediante Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN), promoviendo tecnologías y estrategias integradas para su implementación.

**Objetivo:** Plantear una aproximación a un modelo de gestión para la implementación de SbN en la mitigación de la CPyD en la cuenca alta del río Cauca.

**Metodología:** Se integraron las dimensiones técnicas, económicas e institucionales del contexto regional con una revisión bibliográfica, empleando bases de datos como OpenAlex y VosViewer, identificando experiencias nacionales e internacionales para abordar la CPyD; además, se registró el seguimiento de las unidades piloto de SbN implementadas en la cuenca alta del río Cauca.

**Resultados:** Las SbN combinan co-beneficios ambientales, económicos y sociales, ecosistemas, incluyendo la mitigación de la CPyD. Investigaciones globales destacan la efectividad de los humedales construidos para tratar contaminantes como agroquímicos y compuestos farmacéuticos; el modelo de gestión propuesto promueve la sostenibilidad y la gobernanza a través de la construcción de procesos asociativos que incrementan la efectividad y sostenibilidad en la implementación de SbN para la mitigación de la CPyD.

**Conclusiones:** Esta primera aproximación permite avanzar hacia la construcción de un modelo de gestión para el control de CPyD mediante SbN que pueda ser evaluado, mejorado y adaptado a situaciones similares a las registradas en la cuenca alta del río Cauca, bajo criterios de selección participativa y construcción colectiva.

**Palabras clave:** Micro-contaminantes, Contaminación Puntual y Difusa, Río Cauca, Soluciones basadas en la Naturaleza, Modelo de Gestión.

## Abstract

**Introduction:** Point and nonpoint-source pollution (PnP) associated with micropollutants in water threatens biodiversity and water security in Colombia, especially in the upper basin of the Cauca River. The Universidad del Valle is leading a project to mitigate this problem through Nature-based Solutions (NbS), promoting technologies and integrated strategies for their implementation.

**Objective:** To propose an approach to a management model for the implementation of an NbS in the mitigation of PnP in the upper Cauca River basin.

**Methodology:** The technical, economic and institutional dimensions of the regional context were integrated with a bibliographic review using databases such as OpenAlex and VosViewer, identifying national and international experiences to address PnP. Additionally, the monitoring of the NBS pilot units implemented in the upper Cauca River basin was recorded.

**Results:** The NbS combines environmental, economic and social co-benefits and ecosystems, including the mitigation of PnP. Global research has highlighted the effectiveness of constructed wetlands in treating pollutants such as agrochemicals and pharmaceuticals. The proposed management model promotes sustainability and governance through the construction of associative processes that increase the effectiveness and sustainability of the implementation of NbS for the mitigation of PnP.

**Conclusions:** This first approach facilitates progress toward the construction of a management model for the control of PnP through an NbS that can be evaluated, improved and adapted to situations similar to those registered in the upper Cauca River basin under the criteria of participatory selection and collective construction.

**Keywords:** Micropollutants, Point and nonpoint-source pollution, Cauca River, Nature-based Solutions, Management model

## ¿Cómo citar?

Ascuntar-Ríos D, Madera-Parra CA, Toro-Vélez AF, Benítez-Se-púlvreda V, Gandini-Ayerbe MA. Disminución de la contaminación en la cuenca alta del río Cauca con soluciones basadas en la naturaleza. Ingeniería y Competitividad, 2025, 27(2) e-20614789

<https://doi.org/10.25100/iyc.v27i2.14789>

Recibido: 03/03/25

Revisado: 31/03/25

Aceptado: 15/04/25

Online: 29/05/25

## Correspondencia

daniel.ascuntar@correo.univalle.edu.co



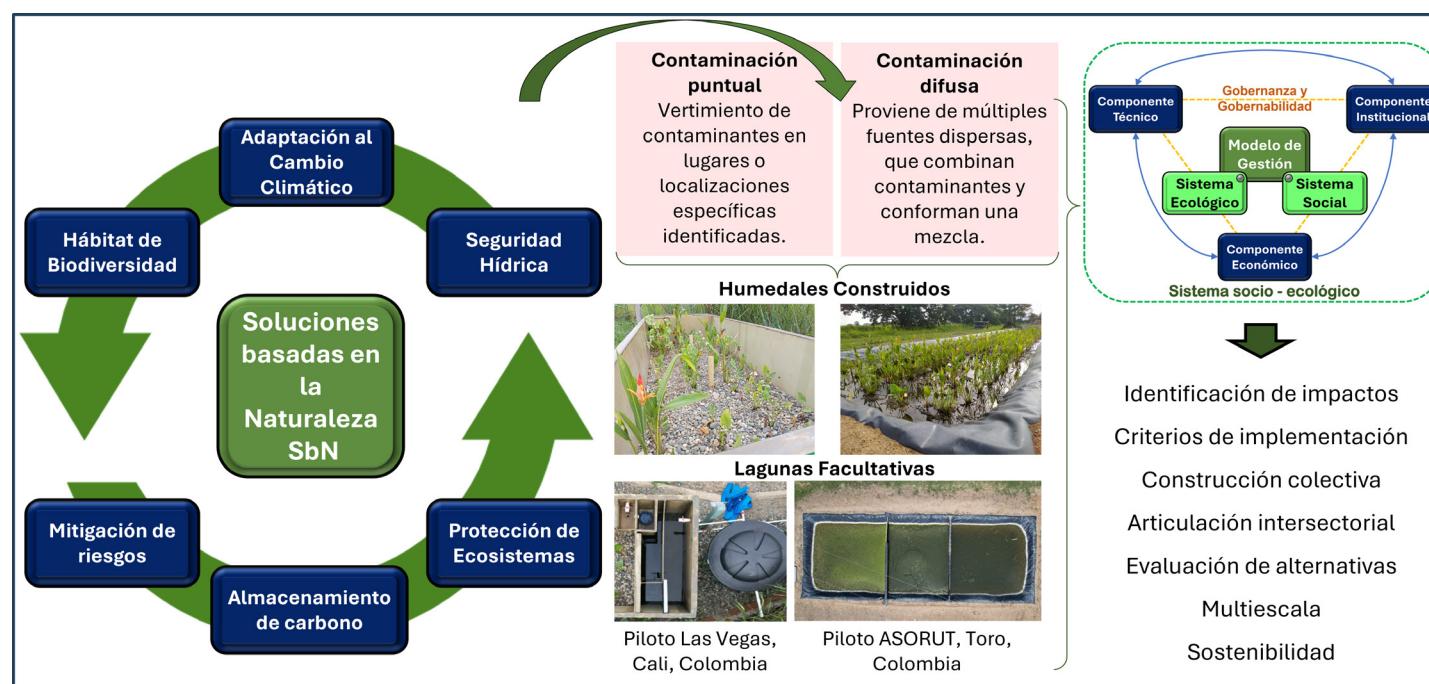
## Contribución a la literatura

Ha quedado claro cómo la contaminación puntual y difusa asociada a microcontaminantes amenaza la biodiversidad y la seguridad hídrica en la cuenca alta del río Cauca en Colombia, y las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) se presentan como un enfoque integral para mitigar su impacto. Su implementación para la calidad del agua en un escenario de gobernanza efectiva revela un gran desafío, para el cual se requiere una estrategia. Por lo tanto, este proyecto busca contribuir con un enfoque inicial para la construcción de un modelo de gestión de la contaminación puntual y difusa mediante SbN que pueda mejorarse y adaptarse a situaciones similares a las reportadas en la cuenca alta del río Cauca, utilizando criterios de selección participativa y aplicación colectiva.

Los resultados más relevantes incluyen:

Un análisis bibliométrico verificó el aumento y las tendencias geográficas en la investigación sobre microcontaminantes y la contaminación puntual y difusa del agua, así como su conexión con la aplicación de Soluciones Basadas en la Naturaleza para su mitigación. Además, la consolidación de estudios asociados con la presencia de microcontaminantes en el río Cauca y sus vertidos revela una grave amenaza para la seguridad hídrica y los ecosistemas de la región. Estos resultados contribuyen a lo siguiente:

La implementación de dos unidades piloto permitió documentar una experiencia que condujo a la formulación inicial de un modelo de gestión conjunta para la proyección, instalación, monitoreo y seguimiento de las SbN para reducir la contaminación puntual y difusa del agua, coordinando el ejercicio entre la academia, las instituciones y el sector privado.



## Introducción

La contaminación del recurso hídrico es uno de los factores que dinamizan la triple amenaza global, sumado a la pérdida de biodiversidad y el cambio climático, agravado por la detección de un amplio espectro de contaminantes antropogénicos en sistemas acuáticos (1-3).

Colombia es reconocido por su amplia diversidad de ecosistemas, albergando el 10% de la biodiversidad del planeta y ocupando el tercer puesto entre los países con mayor cantidad de agua a nivel global (4). El río Cauca es el segundo en magnitud e importancia del país, denominando su cuenca alta como aquella circunscrita en los Departamentos de Valle del Cauca y Cauca (Figura 1), en cuyo recorrido recibe tributarios, vertimientos líquidos de origen doméstico, industrial, agroindustrial y minero (5), que pueden proceder de fuente puntuales o difusas, con consecuentes impactos ambientales, culturales y socioeconómicos que ponen en riesgo la seguridad hídrica.

Dentro de los contaminantes identificados se han registrado micro-contaminantes en la cuenca alta del río Cauca (7), los cuales pueden tener impactos negativos sobre la salud humana, ambiental y ecosistémica, afectando la biodiversidad, la funcionalidad biológica y sus hábitats, así como la disponibilidad de agua para las diferentes actividades socioeconómicas y culturales en el territorio (8); dichos contaminantes se manifiestan como agentes de presión que aún no han sido suficientemente estudiados y tienen alto potencial de afectación sobre los servicios ambientales de la cuenca.



Figura 1. Localización de la cuenca alta del río Cauca

Fuente: Colectivo Río Cauca (6)

Hofman-Caris & Hofman (9) señalan que las tecnologías de tratamiento tradicionales tienen un rendimiento limitado para la eliminación de micro-contaminantes, por lo tanto, se requieren tecnologías de tratamiento más avanzadas o nuevas alternativas que comprendan enfoques innovadores.

Ante ello, se han identificado alternativas tecnológicas de tratamiento que emplean Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) para reducir la carga de contaminantes en el agua, que representan no solo oportunidades para la regulación de caudales, mitigación de riesgos y adaptación climática,

sino también para la descontaminación, en tanto tienen la capacidad de reducir la concentración de múltiples sustancias, entre ellas, micro-contaminantes tales como fármacos y agroquímicos, mediante alternativas como lagunas de estabilización y humedales construidos (7, 10, 11, 12, 13, 14, 15 y 17). Sin embargo, la implementación de este tipo de alternativas y sus modelos de gestión plantean diversos interrogantes y aún carecen de documentación e información de soporte que faciliten su incorporación y sostenibilidad.

La Universidad del Valle, en el marco de un ejercicio de articulación con la Plataforma Colaborativa por la recuperación del río Cauca (Colectivo río Cauca), ha desarrollado el proyecto de investigación "Contribución en la recuperación de la cuenca alta del río Cauca como sistema socio-ecológico mediante la mitigación de la contaminación puntual y difusa a través de Soluciones basadas en la Naturaleza", financiado por el Sistema General de Regalías (SGR BPIN:2021000100492), con el apoyo del proyecto Water Security & Sustainable Development HUB (<https://www.watersecurityhub.org>). Se perfilaron tres objetivos que se resumen en: i) Generar conocimiento sobre las dinámicas que generan la CPyD, ii) Disminuir la carga de contaminantes asociadas a CPyD mediante SbN y iii) Gestionar la articulación institucional para el control de CPyD mediante SbN.

Sobre el tercer objetivo, se planteó una alternativa que responda ante la insuficiencia de información para la implementación de SbN en el control de CPyD, partiendo de un estado del arte, con el cual se construyó una primera aproximación a lo que sería un modelo de gestión y articulación institucional, fundamentado en una base conceptual y complementada con los resultados obtenidos en el marco de la misma investigación.

El modelo de gestión se planteó en el marco del sistema socio-ecológico, donde los ecosistemas, las cuencas hidrográficas y la biodiversidad constituyen la base del patrimonio biocultural que sostiene los medios de vida de las comunidades, siendo el agua el eje integrador de procesos ecológicos y sociales. La gestión sostenible de estos espacios requiere la participación activa de las instituciones y la sociedad civil, quienes deben trabajar colectivamente para la implementación de soluciones que reconozcan la diversidad cultural, el conocimiento local y la interdependencia entre naturaleza y sociedad, promoviendo transiciones socio-ecológicas orientadas a la sostenibilidad.

## Materiales y métodos

Para el modelo de gestión se construyó un estado del arte a partir de información de diversas bases de datos y fuentes bibliográficas, que sirvieron de insumos para proponer una herramienta que incluya la estructuración conceptual y herramientas de selección de SbN. Además, se elaboró un análisis bibliométrico que proporciona elementos para conocer la actividad científica y se enfoca en la evaluación del comportamiento de las investigaciones, permitiendo identificar la interacción entre autores, temáticas y la cantidad de documentos publicados (18), facilitando una herramienta para conocer el contexto actual sobre contaminación puntual, difusa y la aplicación de SbN.

Se definió el objetivo de la búsqueda y se identificaron fuentes confiables como artículos científicos y organizaciones reconocidas, determinando la importancia de la información aportada para estructurar el estado del arte y entrelazar ideas. Se emplearon bases de datos como ScienceDirect, Web Of Science, Scopus, OpenAlex, Elsevier, Scielo, Google Scholar, además de las plataformas de UICN, Think Nature, Oppla, Panorama y Nature-based Solutions Initiative. Teniendo en cuenta que la base de datos de OpenAlex fue sugerida como una de las más completas en la web, el análisis bibliométrico fue realizado mediante los resultados obtenidos en ella, empleando las siguientes ecuaciones de búsqueda:

Water AND point AND pollution OR water AND nonpoint AND pollution (Ecuación 1)

Water AND point AND pollution AND nature-based solutions OR water AND nonpoint AND pollution AND nature-based solutions (Ecuación 2)

Las ecuaciones construidas fueron concatenadas con el conector lógico OR para lograr resultados de dos ecuaciones en una única búsqueda, implicando el uso de cuatro ecuaciones de búsqueda integradas en dos. Para facilitar el análisis de la información, se empleó el software bibliométrico VosViewer desarrollado por Van Eck NJ et al. (19), el cual permite la identificación de los autores, países y conceptos más representativos de las temáticas.

Para la construcción de las distintas redes, se llevó a cabo la consulta de las ecuaciones de búsqueda en la base de datos OpenAlex, posteriormente se seleccionaron los aspectos de interés tales como autor, país y palabras clave. De cada uno de estos aspectos se generó el enlace API (Application Programming Interface), el cual fue insertado directamente en VosViewer para generar las redes.

Las redes de coautoría fueron construidas con un rango de 2 a 25 autores, por países se construyeron con un rango de 2 a 25 países; mientras que las redes de coocurrencias de palabras clave se construyeron con un mínimo de cinco conceptos. Finalmente, fue mediante la información de los 10 autores, países y palabras claves más importantes que se realizó el análisis bibliométrico junto con sus respectivas redes.

Complementariamente, en la propuesta de modelo de gestión se emplearon los documentos generados al interior del proyecto, organizando la información en función de conceptos sombrilla como la CPyD, las SbN y su integración con los retos actuales como la reducción de la contaminación, la adaptación al cambio climático y la conservación de la biodiversidad.

Con toda la información recopilada y consolidada se logró armonizar las definiciones alrededor de los conceptos de CPyD, vincular las SbN y su interpretación para los objetivos específicos de la investigación y estructurar matrices con contenido bibliográfico de las diferentes experiencias a nivel nacional e internacional para la implementación de SbN; conjuntamente, se estructuraron esquemas conceptuales del modelo de gestión y se definieron algunos lineamientos y herramientas, como parte de una primera aproximación en su implementación.

## Resultados y Discusión

Los contaminantes emergentes o micro-contaminantes, cuyo origen puede provenir de fuentes puntuales o difusas, son compuestos químicos sintéticos o naturales poco monitoreados en el ambiente, pero que tienen el potencial de causar efectos adversos sobre los ecosistemas o la salud humana. Su bioactividad y bioacumulación los convierten en contaminantes de gran preocupación, ya que pueden persistir en el ambiente durante largos períodos y acumular altas concentraciones en los ecosistemas (20,21), así como generar nuevas sustancias (metabolitos) en sus procesos de transformación (3,21).

### Contaminación puntual y difusa

Según Hurtado (22) y Guadarrama-Tejas et al. (23), existen dos fuentes de contaminación hídrica: la contaminación de origen puntual y la difusa. Las fuentes puntuales se refieren a la descarga de agentes contaminantes en lugares o localizaciones específicas identificadas, cuyas características, además de la carga orgánica y de sólidos, incluyen una amplia gama de productos de uso diario de origen industrial o doméstico, como fármacos, productos de cuidado e higiene personal, microplásticos, nanopartículas, etc. Como ejemplos están las descargas puntuales de industrias, de alcantarillados o de plantas de tratamiento de agua residual (24).

La contaminación difusa no proviene de una única fuente localizada, sino de múltiples fuentes dispersas, a través de procesos de escorrentía, precipitación, infiltración, deposición atmosférica, drenaje o modificaciones hidrológicas, proceso en el cual se combinan diversos tipos de

contaminantes y conforman una mezcla de sustancias orgánicas e inorgánicas que puede llegar al agua superficial, al suelo y al acuífero, complicando significativamente su identificación y análisis, presentando un desafío mayor para su evaluación y control. Las fuentes difusas de contaminación que se originan en las cuencas dominadas por la agricultura transportan cantidades considerables de nutrientes (nitrógeno y fósforo), así como compuestos orgánicos de difícil degradación como los agroquímicos, los cuales llegan a los cuerpos de agua superficiales y pueden afectar el ecosistema acuático (11, 25).

De acuerdo con un análisis bibliométrico realizado por la Universidad del Valle (26), la CPyD ha sido ampliamente investigada a nivel mundial entre el año 2020 y el 2024. Se destacó la participación de países del continente asiático, europeo y americano con China y Estados Unidos liderando el número de publicaciones (Tabla 1) y en América Latina, participaron países como Uruguay, México y Colombia (Figura 2).

Tabla 1. Países destacados por sus publicaciones acerca de CPyD en agua

No	País	Publicaciones	Citaciones	No	País	Publicaciones	Citaciones
1	China	382	2447	6	Alemania	26	249
2	Estados Unidos	352	2519	7	Italia	26	610
3	Reino Unido	44	790	8	Francia	25	540
4	Australia	38	664	9	Austria	10	332
5	Japón	27	255	10	Países Bajos	19	328

Fuente: Universidad del Valle (26)

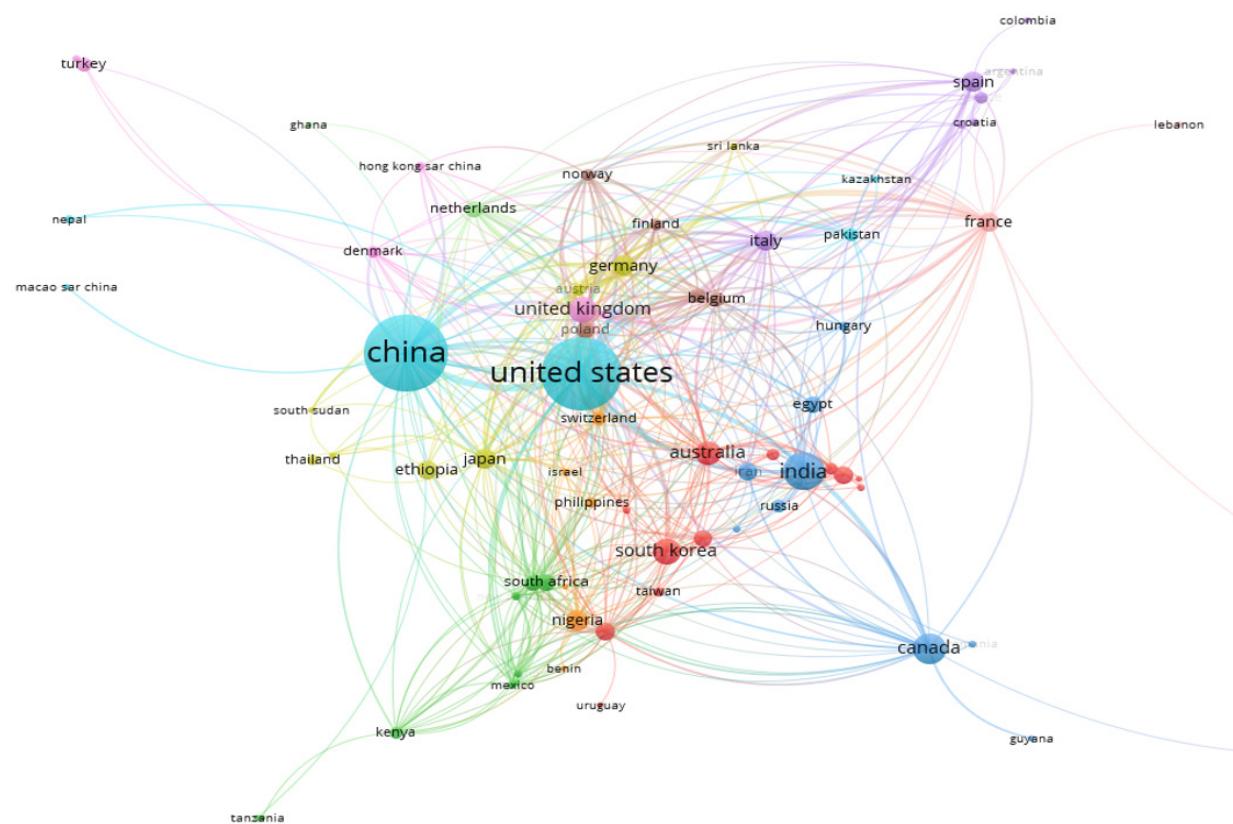


Figura 2. Red de países donde fueron realizadas las investigaciones en torno a la temática de contaminación puntual y difusa  
Fuente: Universidad del Valle (26)

En el Valle del Cauca se ha identificado la presencia de micro-contaminantes provenientes de CPyD, como las sustancias farmacológicas descargadas por la Planta de Tratamiento de Agua Residual de Cañaveralejo (PTAR-C) al río Cauca, según lo reportado por Madera-Parra et al. (8) y Jiménez-Bambague (27). Ambos autores afirman la presencia de diclofenaco, ibuprofeno, paracetamol y otros compuestos en dicha descarga con potencial de afectación ambiental y sanitaria (Figura 3).

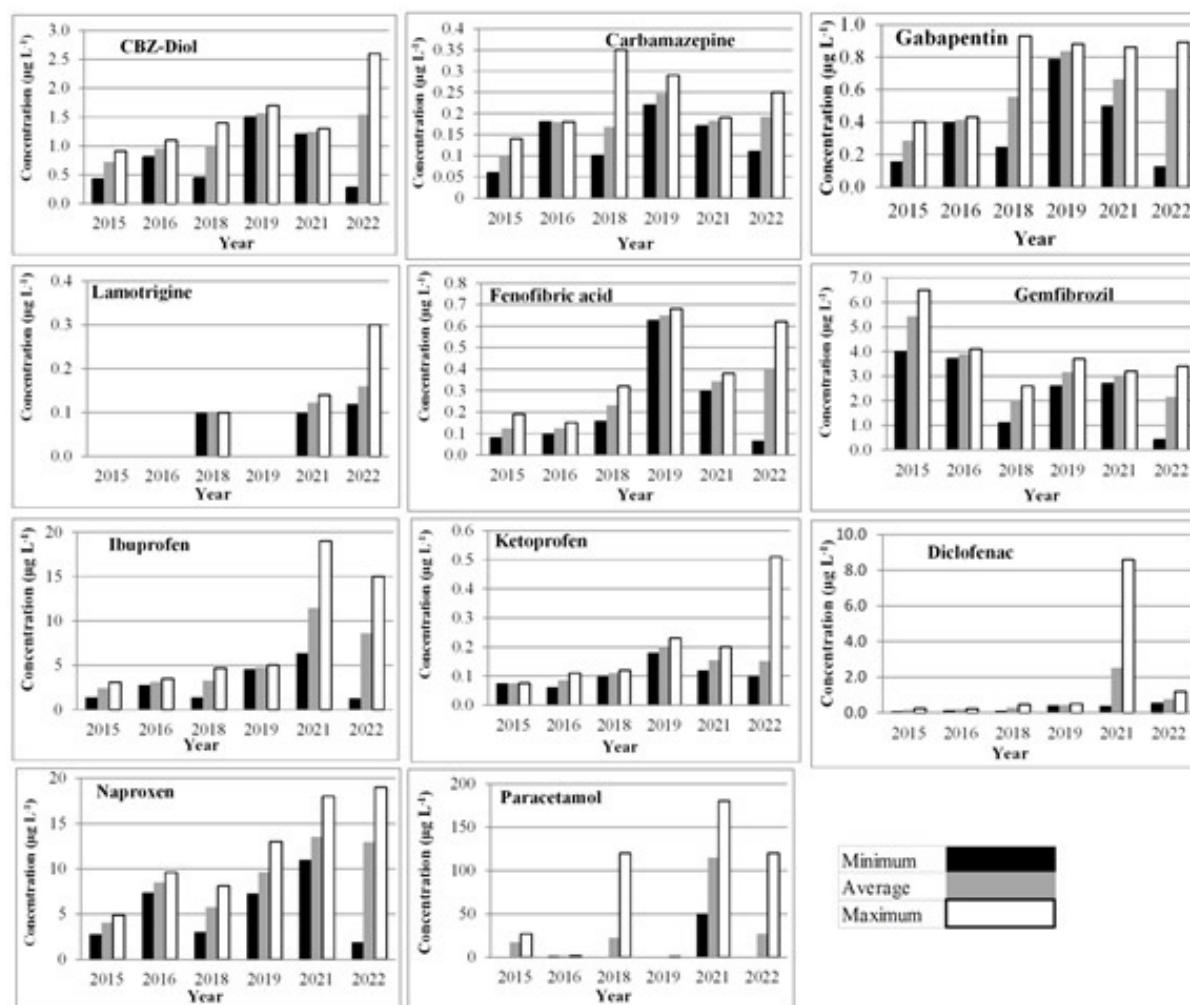


Figura 3. Concentración máxima de compuestos farmacéuticos en el efluente de la PTAR-C, años 2015 a 2022

Fuente: Jiménez et al. (27)

Así mismo, se ha estudiado y detectado la presencia de agroquímicos en suelos de 26 municipios del departamento del Valle del Cauca, con concentraciones entre 10 a 941 µg/kg y en algunos casos concentraciones que superan las detectadas en estudios internacionales llevados a cabo en Alemania, España, China e India. Se destaca la presencia de clotianidina, imidacloprid, fipronil (sp), bromacilo, carbendazina, tiametoxam, diurón y bifenilo. Estos plaguicidas fueron detectados en suelos de cultivos como caña de azúcar, cítricos, lulo, maíz, piña, habichuela, maracuyá, mora, papaya, pasto, plátano, ají, y tomate. De igual manera, análisis preliminares realizados en el agua del río Cauca, han permitido identificar compuestos agroquímicos presentes en diferentes puntos monitoreados (Tabla 2).

Tabla 2. Compuestos agroquímicos registrados en diferentes puntos consecutivos del río Cauca

Grupo de pesticidas	Puntos de Monitoreo			
	Suárez (P1) n = 4	Juanchito (P2) n = 4	Mediacanoa (P3) n = 4	La Virginia (P4) n = 4
Organoclorados (mg/L)				
a-HCH*	58,6	213,8	809,2	217,2
b-HCH*	ND**	229,9	194,4	69,5
Lindano*	75,2	136,7	398,9	101,5
Heptacloro*	0,4	1,3	2,5	1,2
Endosulfán I	3,2	8,3	4,5	6,9
4,4'- DDE*	1,6	1,3	2,4	1,3
Endrín*	3,3	5,8	13,1	4,7
4,4'- DDD*	ND**	1,2	0,9	1,1
DDT*	ND**	4,2	0,4	3,0
Metoxicloro	1,2	3,7	2,7	4,4
Organofosforados (mg/L)				
Profos	ND**	58,2	37,9	39,3
Dimetoato	28,9	541,6	7,0	773,8
Fenclorfos	ND**	ND**	ND**	0,64
Clorpirifos	14,6	66,9	179,4	125,6

\* Compuestos agroquímicos prohibidos en la Convención de Estocolmo o en Colombia

\*\* ND = No detectables

Fuente: Toro-Vélez (28).

Los resultados de los estudios referenciados evidencian la presencia de contaminantes de origen farmacéutico y agroquímico en los vertimientos que descargan al río Cauca (Figura 3), así como su presencia en distintos tramos del mismo (Tabla 2), sin conocer la magnitud en términos de impacto. Las tecnologías tradicionales de potabilización de agua en el valle del Cauca como la precipitación, filtración y cloración o las de tratamiento de agua residual como la sedimentación, sistemas aerobios o anaerobios, no están diseñados para degradar o eliminar micro-contaminantes, lo que ha impulsado la necesidad de soluciones innovadoras que armonicen con los sistemas existentes.

Expertos recomiendan un enfoque integrado que combine sistemas naturales e ingenieriles para garantizar una gestión del agua sostenible y eficiente. En este contexto, las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) emergen como una estrategia competente para el control de la CPyD, con creciente interés en su implementación debido a sus beneficios económicos y ambientales.

De acuerdo con Acuña et al. (29), las SbN emergen como alternativas para proteger, preservar y restaurar ecosistemas, brindando métodos para enfrentar retos ambientales, económicos y socio-ecológicos como el calentamiento global, el cambio climático, la seguridad alimentaria e hídrica y la prevención de desastres, generando beneficios como la captura de carbono, enriquecimiento de biodiversidad, generación de materias primas, regulación hídrica, descontaminación, entre otros (29, 30).

#### Soluciones Basadas en la Naturaleza

La revisión bibliográfica alrededor del control de la CPyD mediante SbN, demostró que los países que lideraron las investigaciones fueron Estados Unidos y China, con 91 y 50 publicaciones, respectivamente. Mientras que el número de documentos publicados en Canadá, Australia y Reino Unido estuvieron por el orden de 25, cada uno (Figura 4).

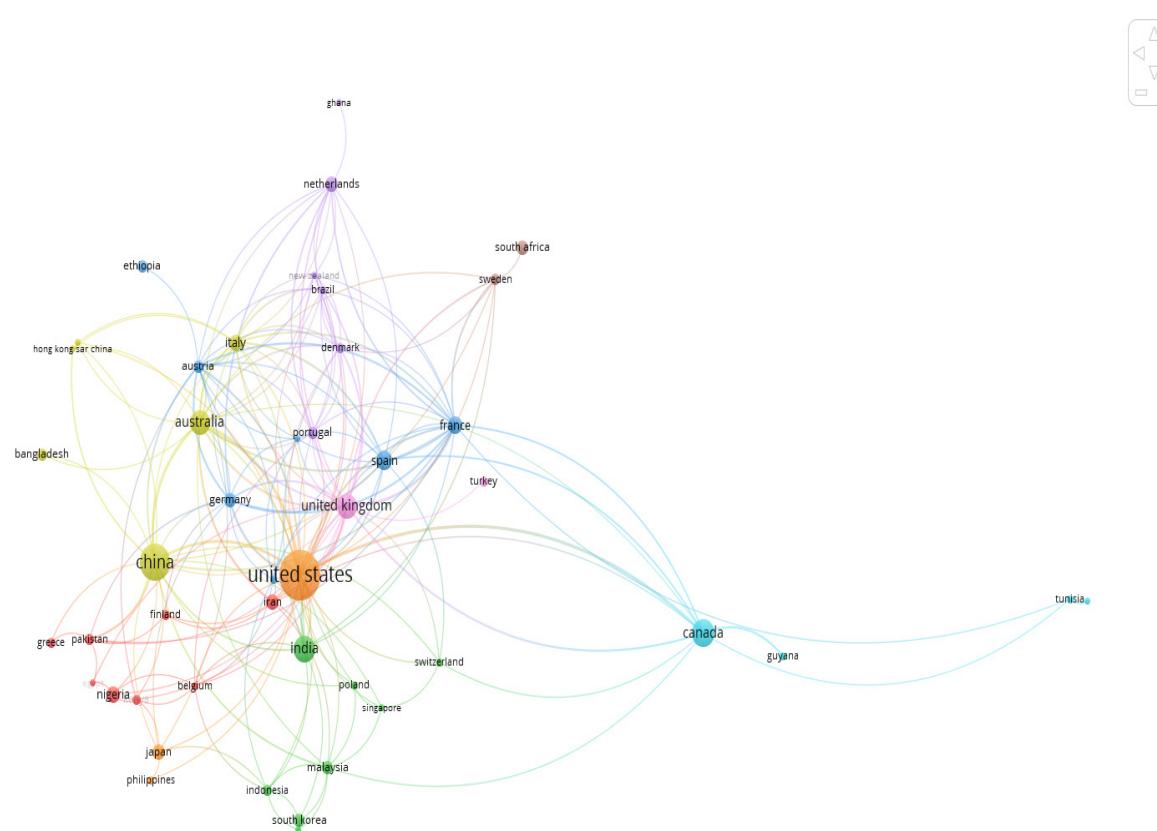


Figura 4. Red de países donde fueron realizadas las investigaciones en torno a la aplicación de las SbN para el control de la contaminación puntual y difusa

Fuente: Universidad del Valle (26)

El término Soluciones basadas en la Naturaleza o SbN emergió en la década de los 90, a través de organizaciones como la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) y el Banco Mundial, quienes buscaban alternativas para la gestión integral de los recursos naturales que se alinearan con los ecosistemas, sin depender de la ingeniería e infraestructura gris. Si bien, este tipo de soluciones surgieron con el concepto de ingeniería ecológica en el siglo XX, no fue sino hasta el año 2016 que se adoptó el término SbN (31-33).

Las SbN abarcan estrategias como la restauración ecológica, reducción de riesgos, gestión de recursos y protección de áreas naturales, ofreciendo un enfoque holístico que no solo protege los ecosistemas, sino que también integra su manejo con los diferentes actores en entornos urbanos y rurales, potenciando procesos naturales para el beneficio social. En la Tabla 3 se presentan algunos ejemplos de SbN empleadas para la regulación hidrológica, la restauración ecológica, adaptación climática y reducción de la contaminación del agua.

Tabla 3. SbN empleadas a nivel global para diferentes propósitos

		
<b>Excavación de zanjas para la restauración de ecosistemas intermareales en Reino Unido</b> <b>Fuente:</b> UICN (34) Implementación de zanjas a las orillas para la creación de nuevos ecosistemas a partir de los excesos de agua generados por las altas mareas.	<b>Lagunas de retención en Italia</b> <b>Fuente:</b> Netti et al. (35) Ecosistemas instalados para el almacenamiento de volúmenes de escorrentía, permitiendo la creación de hábitat y el mantenimiento de flujos ecológicos (36). En la agricultura también suelen emplearse para el almacenamiento de agua y su utilización en época de sequía.	<b>Franjas de protección con vegetación en Italia</b> <b>Fuente:</b> Netti et al. (35) Restauración de la vegetación en zonas riparias para la mejora del paisaje, biodiversidad, ecología, regulación de flujos y la reducción de contaminación hídrica.
		
<b>Terrazas construidas en Italia</b> <b>Fuente:</b> Paliaga et al. (37) Construcción de terraplenes perpendiculares para la reducción de la erosión y el riesgo de deslizamiento de tierras.	<b>Reforestación de bosques de manglar en El Salvador</b> <b>Fuente:</b> UICN (34) Medida de conservación de ecosistemas para mejorar humedales y manglares y proveer bienestar socioeconómico de la población a partir de la obtención de maderas y pesca.	<b>Humedales construidos en Colombia</b> <b>Fuente:</b> García et al. (38) Sistemas que buscan simular humedales plantados para la reducción de la contaminación de las aguas (39).

Dentro de las SbN más estudiadas y empleadas con múltiples beneficios se presentan los humedales construidos que, de manera más frecuente, se han investigado para el tratamiento de la CPyD. Estos han sido considerados sistemas capaces de tratar contaminación por nutrientes, agroquímicos y fármacos, lo cual fue evidenciado por Chen et al. (10), Kasak et al. (11), Matamoros et al. (40), UNESCO/ ONU-Agua (32), Guzmán (33), Ofiera et al. (41) y Liu et al. (13). Se encontraron resultados positivos para la reducción de estas sustancias con eficiencias de hasta el 90%. Sin embargo, Matamoros et al. (40), también afirmó que existen algunos fármacos que no resultaron eliminados o inmovilizados por estos sistemas, señalando la necesidad de evaluación y contextualización para la adaptabilidad de estas tecnologías.

En Latinoamérica, Guzmán (33) documentó experiencias de implementación de humedales construidos como solución para la contaminación ocasionada por la producción de cosméticos. En Colombia, se encontraron autores como Castellanos-Estupiñán et al. (42), quien evaluó la posibilidad de eliminar la contaminación difusa mediante la implementación de microorganismos y humedales a partir de la actividad de algas y cianobacterias. En la Tabla 4 se presentan algunos ejemplos de humedales construidos utilizados en diferentes partes del mundo para la mitigación y reducción de riesgos socio-ecológicos.

Tabla 4. Humedales construidos como SbN para diferentes propósitos

		
Humedal de flujo superficial ubicado en el Reino Unido Fuente: Thames21 (43)	Humedal de flujo superficial ubicado en el Parque de La Babilla, Cali-Colombia Fuente: El País (44)	Humedales estacionarios en el río Hogsmill-Reino Unido Fuente: Universidad del Valle (45)
		
Humedal natural Charco Azul en Cali-Colombia Fuente: CVC (46)	Humedal de flujo superficial en Langtou-China Fuente: Vymazal (47)	Humedal de flujo superficial en Orlando-Florida, USA Fuente: Vymazal (47)
		
Humedal de flujo superficial en Montreal-Canadá Fuente: Vymazal (47)	Humedal de flujo superficial en Otorohanga-Nueva Zelanda Fuente: Vymazal (47)	Humedal de flujo superficial en Dapeng Bay-Taiwán Fuente: Vymazal (47)

Los efectos multidimensionales de las SbN se han denominado co-beneficios (Tabla 5), los cuales aportan a los tres pilares básicos que son la economía, ambiente y sociedad, dado que imitan la capacidad que posee la naturaleza para recuperarse y autorregularse, produciendo bienes y servicios que pueden ser aprovechados por las comunidades de manera sostenible.

Tabla 5. Algunos co-beneficios asociados a las SbN

- |   |   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Seguridad alimentaria</li> <li>▪ Conexión cultural y espiritual</li> <li>▪ Regulación de la calidad del aire</li> <li>▪ Captura de carbono y GEI</li> <li>▪ Conservación de hábitat</li> <li>▪ Disponibilidad de materias primas</li> <li>▪ Recreación mediante acceso a espacios</li> <li>▪ Regulación climática</li> <li>▪ Regulación hídrica</li> <li>▪ Retención de contaminantes</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Circulación de nutrientes</li> <li>▪ Recursos medicinales</li> <li>▪ Integración social y colectividad</li> <li>▪ Aportes a la fotosíntesis y la polinización</li> <li>▪ Seguridad hídrica</li> <li>▪ Mejoramiento paisajístico</li> <li>▪ Control a la erosión</li> <li>▪ Reducción de enfermedades</li> <li>▪ Generación de empleos verdes</li> <li>▪ Descontaminación del agua</li> </ul> |
|---|---|

Fuente: Alcaldía de Santiago de Cali et al. (48), OMS (49), Birdlife international et al., (30); Mori-Clement y Mori-Clement, Zapata (16).

Si bien las SbN se han concebido principalmente para la adaptación al cambio climático, en Colombia se ha popularizado su utilización para resolver situaciones asociadas a la calidad del agua, la reconexión ecológica y la conservación de la biodiversidad, como lo muestran algunos ejemplos en la Tabla 6.

Tabla 6. Humedales construidos como SbN en Colombia

		
Humedal construido de flujo subsuperficial, Ginebra, Valle del Cauca	Lagunas de estabilización, Ginebra, Valle del Cauca	Filtración en lecho de río, Cali, Valle del Cauca
		
Filtración en múltiples etapas, Mondono, Cauca	Humedal construido de flujo superficial, Cali, Valle del Cauca	Parque Ambiental Corazón de Pance, Cali, Valle del Cauca

Fuente: Alcaldía de Santiago de Cali (50), El País (44), García et al. (38)

Las SbN se resumen en acciones que se apoyan en los ecosistemas y los servicios que estos proveen para encarar diversos retos sociales (34). Estas alternativas se han considerado aplicables a diferentes escalas (51), incluyendo el control de la CPyD.

#### Modelo de gestión para el control de la CPyD mediante SbN

En cada una de estas iniciativas de SbN reportadas en la literatura se han empleado humedales, cuencas secas, adecuación de franjas riparias, fitorremediación, zonas de bioretención o infiltración, reemplazo de infraestructura gris por verde, entre otros, con el objetivo principal de lograr la restauración de ecosistemas, regulación hídrica y la preservación de la biodiversidad (30, 43, 52, 53), mientras otros estudios con coberturas vegetales han logrado el aprovechamiento y reúso de aguas contaminadas (54).

Sin embargo, poco se ha documentado acerca de los procesos de implementación, desde que se concibe la idea hasta que se materializa la SbN y se define su seguimiento y su estrategia de gobernanza. Se destaca la iniciativa presentada por RECONNECT (52), la cual ha promovido el uso de las SbN en diversos territorios, traspasando barreras para el desarrollo de resiliencia y adaptación al cambio climático, en las cuales han documentado procesos completos desde el inicio, incluyendo los ejercicios de gobernanza, las articulaciones interinstitucionales e intersectoriales, la construcción de herramientas de selección y los modelos para su gestión y sostenibilidad.

Casos como Gerundo et al. (55), que llevaron a cabo la simulación del riesgo, evaluando el impacto de la implementación de SbN en múltiples escenarios o Pueyo-Ros & Comas (56), que desarrollaron herramientas como Nat4Wat para facilitar el proceso de selección de SbN, así como Rincón y Arteaga (57) o la SDA (58), que han implementado la infraestructura verde-azul y los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) en estrategias de conservación, proyectos de adaptación y mitigación de riesgos hidrometeorológicos, demuestran algunas iniciativas reportadas para la implementación y gestión de SbN en diferentes contextos, desde una perspectiva técnica.

La gobernanza se ha identificado como un aspecto inherente en la implementación de SbN, donde se reconocen a las comunidades como los actores primarios, seguidos de las demás instituciones, destacando la necesidad de cooperación entre ellos y la necesidad de una sinergia entre el gobierno y la sociedad civil para la consecución de los objetivos de este tipo de proyectos y su sostenibilidad (59, 60).

Se destaca que existen experiencias donde se ha promovido la participación de organizaciones gubernamentales y no gubernamentales, como es el caso de la intervención realizada al parque Gorongosa en Mozambique, la cual fue presentada por ECOHUB S.A.S. (61). Asimismo, Thames21 (43), presentó un equipo conformado por instituciones del ámbito académico, servicios públicos, nacionales e internacionales, el cual favoreció a la consecución de recursos y ejecución de las actividades. También, desde la experiencia en otros proyectos, se ha promovido la unión entre actores a través de la extensión de conocimiento alrededor de las SbN de manera masiva (62, 63).

En Colombia, el Instituto Humboldt ha promovido las SbN y el concepto de la transición socio-ecológica hacia la sostenibilidad desde el reconocimiento de la relación humano-naturaleza como una necesidad para la gestión de la biodiversidad (64), lo cual representa un requerimiento básico para un modelo de gestión, dado que permite comprender la interdependencia entre las dinámicas sociales y los procesos ecológicos, brindando una visión integrada que facilita la implementación de acciones que no solo restauran y protegen los ecosistemas, sino que también responden a las necesidades y realidades de las comunidades locales, considerando factores como la cultura, la economía, el conocimiento tradicional y la gobernanza.

Bajo ejercicios de integración conceptual similares el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, en 2018 publicó la Guía de Adaptación Basada en Ecosistemas (65) y en 2023 publicó la guía ECO RRD, para la implementación de medidas de reducción de riesgo de desastres, basado en ecosistemas: énfasis en ecosistemas marino-costeros (66). Por su parte, el Departamento Nacional de Planeación (DNP), planteó en 2020 una estrategia de reactivación y repotenciación económica resiliente y sostenible, en la cual las SbN son una de las líneas estratégicas (67). Adicionalmente, la Procuraduría General de la Nación, construyó la Guía de obligaciones ambientales para alcaldías y gobernaciones de Colombia (2020), en la que se destaca la implementación de SbN, como herramientas clave para la construcción de territorios resilientes (68).

Otro caso particular de impulso a la gobernanza es el de la Laguna de Sonso, que se encuentra ubicada sobre la margen derecha del río Cauca, entre los municipios de Buga, Yotoco y Guacarí; es un lugar de singular valor ecológico para el departamento del Valle del Cauca por su paisaje, amplia biodiversidad y su alto potencial turístico y recreacional, así como su vinculación al listado RAMSAR en el año 2017 (69).

Para la presente investigación se diseñaron e instalaron dos unidades a escala piloto de SbN para la evaluación en la degradación o eliminación de los contaminantes orgánicos provenientes de compuestos agroquímicos y farmacéuticos, cuyo seguimiento proporcionó la información para construir una aproximación a un modelo de gestión.

Una de ellas se instaló en la Estación de Bombeo de Agua Residual Las Vegas en Santiago de Cali, administrada por las Empresas Municipales de Cali (EMCALI EICE ESP), utilizando tanques en fibra de vidrio donde se tiene un acople tecnológico compuesto de una laguna facultativa y un humedal construido subsuperficial de flujo horizontal, como piloto para la reducción de contaminación puntual del agua proveniente del Canal Interceptor Sur (Figura 5).



Figura 5. Unidad piloto de tratamiento de contaminación puntual empleando SbN  
Fuente: Universidad del Valle (53)

El sistema piloto para contaminación difusa se instaló en el Distrito de Riego de la Asociación de Usuarios del Distrito de Adecuación de Tierras de los Municipios de Roldanillo, La Unión, Toro – ASORUT (Valle del Cauca), en el cual se adecuó un humedal construido de flujo subsuperficial, una laguna facultativa y una madre vieja, para evaluar su eficiencia en la degradación de contaminantes de agroquímicos presentes en los canales de riego y de drenaje del sector (Figura 6).



Figura 6. Unidad piloto de tratamiento de contaminación difusa empleando SbN  
Fuente: Universidad del Valle (53)

La proyección, diseño e instalación de las unidades piloto se hizo desde un comienzo en cooperación con EMCALI EICE ESP y ASORUT, mediante talleres de construcción colectiva, visitas a terreno para explorar disponibilidad de áreas y definición de criterios para la implementación de las respectivas SbN, pensando a futuro que serían ellos quienes se encargarían de la operación y mantenimiento de dichas unidades. Con ello se logró la articulación entre la sociedad civil y las instituciones gubernamentales, como punto de partida en un modelo de gestión.

En la proyección del modelo fue necesario identificar los actores que intervendrán o que se verán beneficiados por la implementación de la SbN, realizar acercamientos, reuniones, talleres y jornadas de construcción colectiva que permitieron llegar a acuerdos en las que todos sean positivamente impactados y que se determinen las viabilidades desde los componentes técnicos, institucionales y económicos. Con estos elementos se construyó un esquema conceptual que permitiera vincular los diferentes componentes que se deben tener en cuenta para la implementación de un modelo de gestión y las características inherentes de un sistema socio-ecológico (Figura 7).



Figura 7. Estructura conceptual del modelo de gestión para el control de la CPyD mediante SbN  
Fuente: Universidad del Valle (53)

Lo primero es reconocer como marco de referencia el sistema socio-ecológico, el cual es esencial para garantizar efectividad y sostenibilidad a largo plazo, reconociendo que los ecosistemas y el desarrollo social están estrechamente interconectados, por lo que cualquier intervención en la naturaleza debe considerar los procesos ecológicos y los contextos socioculturales, económicos e institucionales, bajo una integración que permita desarrollar modelos de gestión inclusivos, adaptables y resilientes, con SbN que brinden co-beneficios para la restauración y conservación ecológica, bienestar humano y participación activa de las comunidades en el cuidado del territorio.

En la estructura conceptual se ofrece un enfoque integral para un sistema socio-ecológico, reconociendo la interdependencia entre los ecosistemas y las comunidades humanas, permitiendo integrar la visión de cuencas hidrográficas con estrategias para conservar y restaurar la biodiversidad y los sistemas acuáticos, al tiempo que se fortalezcan los medios de vida locales, especialmente cuando se valoran y protegen el patrimonio biocultural y los saberes tradicionales.

Para ello, se requiere una gobernanza colaborativa, en la que instituciones y sociedad civil trabajen de manera articulada, impulsando transiciones socio-ecológicas mediante SbN hacia modelos de gestión más sostenibles y resilientes.

Es recomendable establecer con claridad tres componentes: 1) Un componente técnico que permita definir y concertar los principales aspectos técnicos de la SbN, que se nutra de todos los referentes disponibles en el territorio donde se vaya a hacer a la instalación. 2) Un componente institucional que consolide y sintetice todos los elementos normativos y lineamientos de política que deban ser tenidos en cuenta para la SbN, contemplando posibles permisos o autorizaciones ambientales, así como su potencial de aportes a los instrumentos locales. 3) Un componente económico que realice el análisis costo-beneficio, incluyendo el balance y cierre financiero, así como los requisitos administrativos para la instalación, operación y el mantenimiento de la SbN.

El modelo de gestión propuesto derivó en una aproximación inicial de una herramienta que permita realizar un proceso de selección (Figura 8), empleando criterios básicos que pueden ser concertados con los actores involucrados en jornadas de construcción colectiva, mediante el cual se elija la SbN adecuada para el control de la CPyD, que se adapte eficientemente a las características biofísicas del espacio y las dinámicas socioeconómicas y culturales del territorio donde se instale, de manera que la SbN tenga mayores probabilidades de ser exitosa y sostenible.

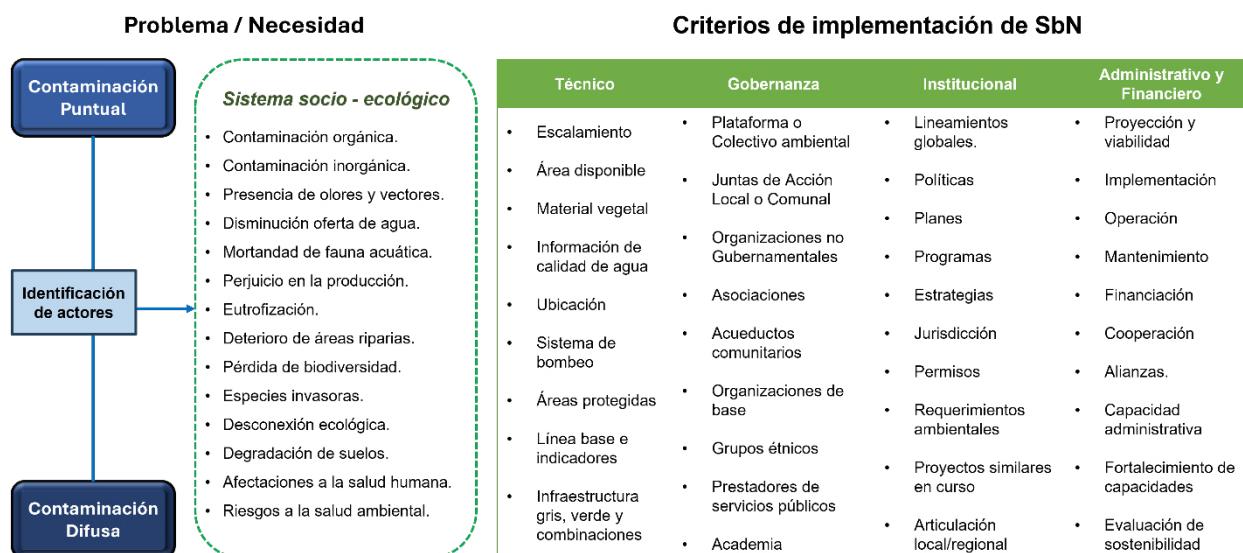


Figura 8. Conceptualización para la selección de SbN en el control de la CPyD

Fuente: Universidad del Valle (53)

El proceso de selección que presenta la Figura 8 incluye diversas problemáticas asociadas a la CPyD y parte de una necesaria identificación de actores que integran el sistema socio-ecológico donde se implementará la SbN, siendo un enfoque fundamental para garantizar la efectividad y sostenibilidad en la implementación, dado que permite articular los procesos ecológicos con los contextos socioculturales, económicos e institucionales que consoliden un balance entre la gobernabilidad y la gobernanza, con la participación de sectores del gobierno y la sociedad civil, impulsando transiciones socio-ecológicas hacia una sostenibilidad real y duradera.

La herramienta participativa de selección parte de criterios biofísicos, socioeconómicos y culturales del territorio, reconociendo que la implementación de una SbN requiere un enfoque integral que articule componentes técnicos, de gobernanza, institucionales y administrativo-financieros.

Desde lo técnico es esencial una caracterización del territorio y sus condiciones ambientales, así como la identificación de riesgos y servicios ecosistémicos clave para seleccionar medidas

apropiadas. En el componente de gobernanza, la identificación y participación concertada de actores locales, institucionales, académicos y comunitarios fortalece la apropiación social y la corresponsabilidad en el manejo del territorio. A nivel institucional, es fundamental alinearse con marcos normativos, políticas e instrumentos de planificación, además de identificar las competencias de las organizaciones responsables. En cuanto al componente administrativo y financiero, se debe establecer la viabilidad económica mediante análisis financieros y mecanismos de sostenibilidad en el tiempo, garantizando una operación y mantenimiento eficientes.

Con ello, la selección de la SbN y su implementación lograría una articulación multidimensional que incrementaría su efectividad, al tiempo que se proyecta su sostenibilidad, legitimidad social y adaptabilidad frente a cambios socio-ecológicos.

## Conclusiones

La CPyD en el agua es una problemática que pone en riesgo la seguridad hídrica, sin que existan aún estrategias técnicas sólidas para su regulación, monitoreo y control, agravado por el hecho de que se han detectado contaminantes provenientes de agroquímicos y fármacos en la cuenca alta del río Cauca, donde las tecnologías convencionales de tratamiento y la capacidad de autorrecuperación del río resultan insuficientes para enfrentar la complejidad de degradar o eliminar estos micro-contaminantes de origen antrópico.

Las SbN aparecen como estrategias innovadoras y eficientes para la transformación y degradación de micro-contaminantes en el agua, cuya investigación e implementación deben fortalecerse, ante la evidencia de estudios que han demostrado sus virtudes desde el ámbito técnico; sin embargo, aún existe una brecha significativa en cuanto a modelos de gestión para la articulación institucional y el fortalecimiento de procesos de gobernanza que aseguren su adecuada adaptación, apropiación, implementación, operación, mantenimiento y sostenibilidad en escenarios contextualizados con proyecciones a mediano y largo plazo.

La implementación de SbN para control de la CPyD requiere un modelo de gestión que integre componentes técnicos, económicos, institucionales y de gobernanza desde una visión de sistema socio-ecológico, el cual evidencie la corresponsabilidad y promueva la apropiación social del territorio, del conocimiento y de las tecnologías, orientando la sostenibilidad de las intervenciones y construyendo estrategias adaptables y resilientes.

El desarrollo participativo de herramientas de selección de SbN para el control de CPyD empleando criterios técnicos, biofísicos, socioeconómicos e institucionales, permite una mejor adaptación de estas soluciones al contexto territorial, fortaleciendo la gobernanza, la toma de decisiones alrededor de la viabilidad técnico-económica y la implementación de transiciones socio-ecológicas sostenibles con co-beneficios para el ambiente, la salud humana y la conservación del patrimonio biocultural.

Esta primera aproximación permite avanzar hacia la construcción de un modelo de gestión para el control de CPyD mediante SbN que pueda ser evaluado, mejorado y adaptado en situaciones similares a las registradas en la cuenca alta del río Cauca, bajo criterios de selección participativa y construcción colectiva con los actores involucrados.

### Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por el Sistema General de Regalías-SGR de Colombia [BPIN 2021000100492] y apoyado por el Water Security and Sustainable Development Hub, financiado por el fondo UK Research and Innovation Global Challenges Research Fund-GCRF del Reino Unido [grant number: ES/S008179/1].

## Declaración de contribución de autoría de CreditT

Conceptualización - Ideas: Daniel Ascúntar-Ríos, Carlos A. Madera-Parra, Andrés F. Toro-Vélez, Valentina Benítez-Sepúlveda y Mario A. Gandini-Ayerbe. Análisis formal: Daniel Ascúntar-Ríos, Carlos A. Madera-Parra, Andrés F. Toro-Vélez, Valentina Benítez-Sepúlveda y Mario A. Gandini-Ayerbe. Investigación: Daniel Ascúntar-Ríos, Carlos A. Madera-Parra, Andrés F. Toro-Vélez, Valentina Benítez-Sepúlveda y Mario A. Gandini-Ayerbe. Curación de datos: Daniel Ascúntar-Ríos, Valentina Benítez-Sepúlveda y Mario A. Gandini-Ayerbe. Financiamiento: Daniel Ascúntar-Ríos, Carlos A. Madera-Parra, Andrés F. Toro-Vélez y Mario A. Gandini-Ayerbe. Metodología: JDaniel Ascúntar-Ríos. Dirección de Proyecto: Carlos A. Madera-Parra, Andrés F. Toro-Vélez. Recursos: Andrés F. Toro-Vélez. Supervisión: Carlos A. Madera-Parra, Andrés F. Toro-Vélez. Validación: Daniel Ascúntar-Ríos, Carlos A. Madera-Parra, Andrés F. Toro-Vélez, Valentina Benítez-Sepúlveda y Mario A. Gandini-Ayerbe. Redacción - borrador original - Elaboración: Daniel Ascúntar-Ríos, Carlos A. Madera-Parra, Andrés F. Toro-Vélez, Valentina Benítez-Sepúlveda y Mario A. Gandini-Ayerbe. Redacción - revisión y edición - Elaboración: Daniel Ascúntar-Ríos, Carlos A. Madera-Parra, Andrés F. Toro-Vélez, Valentina Benítez-Sepúlveda y Mario A. Gandini-Ayerbe.

Financiación: no declara. Conflicto de intereses: no declara. Aspecto ético: no declara

## References

1. Calgaro L, Giubilato E, Lamon L, Semenzin E, Marcomini A. Fate and transport of ten plant protection products of emerging concern in a coastal lagoon: Application and evaluation of a multimedia level III fugacity model. Env. Res. 2024; Vol. 263, (Part 1), 120047. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2024.120047>
2. Sharma S, Bhattacharya A. Drinking water contamination and treatment techniques. App. Wat. Sci. 2016; 7(3), 1043–1067. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/S13201-016-0455-7>
3. Geissen V, Mol H, Klumpp E, Umlauf G, Nadal M, van der Ploeg M. Emerging pollutants in the environment: A challenge for water resource management. ISWCR, 2015; 3(1), 57–65. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.ISWCR.2015.03.002>
4. DNP. Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022, Pacto por Colombia, pacto por la equidad. Ley 1955 de 2019. Departamento Nacional de Planeación de Colombia. Disponible en: <https://www.supervigilancia.gov.co/documentos/5027/plan-nacional-desarrollo-2018-2022/>
5. Universidad del Valle. Revisión, compilación y divulgación de estudios asociados con la contaminación puntual y difusa. Proyecto "Contribución en la recuperación de la cuenca alta del río Cauca como sistema socio-ecológico mediante la mitigación de la contaminación puntual y difusa a través de Soluciones basadas en la Naturaleza", financiado por el Sistema General de Regalías de Colombia (SGR BPIN:2021000100492). 2023. Proyecto en ejecución por parte de la Universidad del Valle, en alianza con la Universidad Autónoma de Occidente y el Departamento Administrativo de Gestión de Medio Ambiente de la Alcaldía de Santiago de Cali. <https://mapainversiones.dnp.gov.co/Buscador/Index?id=2021000100492>
6. Colectivo Río Cauca. Acuerdo de voluntades - Plataforma Colaborativa para la recuperación de la cuenca alta del río Cauca, firmado el 21 de agosto de 2020. [Internet]. Colectivo por la recuperación del río Cauca. Disponible en: <https://colectivoriocauca.com/>
7. Jiménez-Bambague EM, Madera-Parra CA, Ortiz-Escobar AC, Morales-Acosta PA, Peña-Salamanca EJ, Machuca-Martínez F. High-rate algal pond for removal of pharmaceutical compounds from urban domestic wastewater under tropical conditions. Case study: Santiago de Cali, Colombia. Water Science and Technology. 2020; 82(6), 1031–1043. Disponible en: <https://doi.org/10.2166/wst.2020.362>

8. Madera-Parra CA, Jiménez-Bambague EM, Toro-Vélez AF, Lara-Borrero JA, Bedoya-Ríos DF, Duque-Pardo V. Estudio exploratorio de la presencia de microcontaminantes en el ciclo urbano del agua en Colombia: Caso de estudio Santiago de Cali. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 2018; 34(3), 475–487. Disponible en: <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.03.10>
9. Hofman-Caris R, Hofman J. Limitations of Conventional Drinking Water Technologies in Pollutant Removal. *Handbook of Environ. Chem.* 2017; 67, 21–51. Disponible en: [https://doi.org/10.1007/698\\_2017\\_83](https://doi.org/10.1007/698_2017_83)
10. Chen J, Ying GG, Wei XD, Liu YS, Liu SS, Hu LX. Removal of antibiotics and antibiotic resistance genes from domestic sewage by constructed wetlands: Effect of flow configuration and plant species. *Sci. Total Environ.* 2016; 571, 974–982. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.085>
11. Kasak K, Kill K, Parn J, Mander U. Efficiency of a newly established in-stream constructed wetland treating diffuse agricultural pollution. *Ecol. Eng.* 2018; 119, 1–7. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.05.015>
12. Lei Y, Wagner T, Rijnaarts H, de Wilde V, Langenhoff A. The removal of micropollutants from treated effluent by batch-operated pilot-scale constructed wetlands. *Wat. Res.* 2023; 230, 119494. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119494>
13. Liu X, Li X, Zhang X, Zhao H, Wang C, Zhu H. Research on the purification effect of major pollutants in water by modular constructed wetlands with different filler combinations. *Wat. Sci. and Tech.* 2024; 89(8), 2090–2104. Disponible en: <https://doi.org/10.2166/wst.2024.107>
14. Sosa FS, Chaparro-Herrera DJ, Vazquez-Arenas J, Nava A, Alva-Martínez AF. Construction of wetlands in La Piedad Lagoon: a strategy to mitigate climate change in Mexico. *Blue-Green Syst.* 2024; 6(1), 54–69. Disponible en: <https://doi.org/10.2166/bgs.2024.038>
15. Rau S. Sponge Cities: Integrating Green and Gray Infrastructure to Build Climate Change Resilience in the People's Republic of China. *Asian Development Bank – ADB Briefs* No 222. 2022; ISBN 978-92-9269-771-6 (print), 978-92-9269-772-3 (electr), ISSN 2071-7202 (print), 2218-2675 (electr). Publication Stock No. BRF220416-2. <https://doi.org/10.22617/BRF220416-2>.
16. Mori-Clement Y, Zapata F. Las Soluciones basadas en la Naturaleza y sus beneficios socioeconómicos para el Perú. Reporte elaborado en el marco del proyecto "Posicionando la evidencia del potencial de las Soluciones basadas en la Naturaleza para la recuperación económica en el sur global", implementado por la Iniciativa de Soluciones basadas en la Naturaleza en el Perú, coordinada por el Instituto de Montaña en colaboración con la Iniciativa de Soluciones basadas en la Naturaleza de la Universidad de Oxford. Instituto de Montaña, Lima, Perú. Disponible en: [https://mountain.pe/wp-content/uploads/2023/12/IdM-2023\\_SbN-Peru\\_Reporte.pdf](https://mountain.pe/wp-content/uploads/2023/12/IdM-2023_SbN-Peru_Reporte.pdf)
17. Mendoza E, Vosse J, Azzellino A, Santos LHMLM., Semitsoglou-Tsiapou S, Comas, J. From shower to table: fate of organic micropollutants in hydroponic systems for greywater treatment and lettuce cultivation. *Blue-Green Syst.* 2024; 6(1), 70–89. Disponible en: <https://doi.org/10.2166/bgs.2024.051>.
18. Zamora R, León JL. Análisis bibliométrico de la revista científica agroecosistemas (2013-2020), de la Universidad de Cienfuegos. Provincia de Cienfuegos, Cuba. *Revista Universidad y Sociedad.* 2021; 13(4), 453-460. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2218-36202021000400453&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202021000400453&lng=es&tlng=es)
19. Van Eck NJ, Waltman L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics.* 2009; 84(2), 523–538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>

20. Stefanakis AI, Becker JA. A Review of Emerging Contaminants in Water: Classification, Sources, and Potential Risks [Internet]. Versión 1.0. Hershey, Pensilvania. IGI Global Scientific Publishing. On McKeown, A. Elaine, and George Bugyi, editors. Impact of Water Pollution on Human Health and Environmental Sustainability. IGI Global, 2016. <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-9559-7>. Disponible en: <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-9559-7.ch003>
21. Teodosiu C, Gilca AF, Barjoveanu G, Fiore S. Emerging pollutants removal through advanced drinking water treatment: A review on processes and environmental performances assessment. In J. of Clea. Prod. 2018; 197:1210–1221. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.247>
22. Hurtado Yow JA. Determinación de la causa raíz de la contaminación difusa y puntual de la calidad de agua en bahía manzanillo, corregimiento de Cristóbal, distrito y provincia de Colón, Panamá. Revista Scientia [Internet]. 2020; 30(2), 1–28. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/6517/651769122001/651769122001.pdf>
23. Guadarrama-Tejas R, Kido-Miranda J, Roldan-Antunez G, Salas-Salgado M. Contaminación del agua. Rev. Cienc. Ambient. Recur. Nat. 2016; 2(5), 1–10. Disponible en: <https://studylib.net/doc/27123987/revista-de-ciencias-ambientales-y-recursos-naturales-v2-n5-1>
24. Galaviz I y Sosa CA. Fuentes Difusas y Puntuales de Contaminación. Calidad de las Aguas Superficiales y Subterráneas. México: Universidad Autónoma de Campeche EPOMEX-UAC. 2019; 142 páginas. Instituto epomex. Instituto Tecnológico de Boca del Río. Disponible en: <https://doi.org/10.26359/epomex0719>
25. Varekar V, Yadav V, Karmakar S. Rationalization of water quality monitoring locations under spatiotemporal heterogeneity of diffuse pollution using seasonal export coefficient. J. Environ. Manag. 2021; 277, 1 January 2021, 111342. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111342>
26. Universidad del Valle. Análisis bibliométrico de la investigación de la contaminación puntual y difusa y la aplicación de SbN para su control. Proyecto "Contribución en la recuperación de la cuenca alta del río Cauca como sistema socio-ecológico mediante la mitigación de la contaminación puntual y difusa a través de Soluciones basadas en la Naturaleza", financiado por el Sistema General de Regalías de Colombia (SGR BPIN:2021000100492). 2024. Proyecto en ejecución por parte de la Universidad del Valle, en alianza con la Universidad Autónoma de Occidente y el Departamento Administrativo de Gestión de Medio Ambiente de la Alcaldía de Santiago de Cali. <https://mapainversiones.dnp.gov.co/Buscador/Index?id=2021000100492>
27. Jiménez-Bambague EM, Madera-Parra CA, Machuca-Martinez F. The occurrence of emerging compounds in real urban wastewater before and after the COVID-19 pandemic in Cali, Colombia. In Curr. Opin. Env. Sci. Hl. 2023; 33, 100457. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2023.100457>.
28. Toro-Vélez, A.F. (2021). Evaluación integral de microcontaminantes en la cuenca alta del río Cauca [Tesis PhD en Ciencias Ambientales]. Cauca: Universidad del Cauca, Colombia; 2021.
29. Acuña V, Castañares L, Castellar J, Comas J, Cross K, Istenic D. Development of a decision-support system to select nature-based solutions for domestic wastewater treatment. Blue-Green Systems. 2023 Dic. 13 [citado 2025 Febr. 24]; 5(2), 235–251. Disponible en: <https://doi.org/10.2166/bgs.2023.005>
30. Birdlife international, EastAsian-Australasian Flyway Partnership, Asian Development Bank. Nature-Based Solutions that Deliver for People, Nature, and the Climate. Asian Development Bank. 2022. Disponible en: <https://www.adb.org/publications/nature-based-solutions-people-nature-climate>

31. Hartmann T, Slavikova L, McCarthy S. Nature-Based Flood Risk Management on Private Land Disciplinary Perspectives on a Multidisciplinary Challenge [Internet]. Suiza: COST. 2019. Springer Open. ISBN 978-3-030-23841-4. ISBN 978-3-030-23842-1 (eBook). Disponible en: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-23842-1>.
32. UNESCO/ONU-Agua. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020: Agua y Cambio Climático. París. Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos. Publicado por la UNESCO en nombre de ONU-Agua. ISBN 978-92-3-300136-7. Disponible en: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373611>
33. Guzmán NP. Soluciones basadas en la naturaleza (SbN) para la gestión sostenible del agua en América Latina y El Caribe [Máster en ciencia y tecnología de la sostenibilidad]. España: Universitat Politecnica de Catalunya Barcelonatech; 2021. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/362078>.
34. UICN. (2020). Estándar Global de la UICN para soluciones basadas en la naturaleza: Un marco sencillo para la verificación, el diseño y la extensión de SbN. 2020. Primera edición. Gland, Suiza. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza - UICN. ISBN 978-2-8317-2060-9. Disponible en: <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2020-020-Es.pdf>
35. Netti AM, Abdelwahab OMM, Ricci GF, Gentile F. Impact of nature-based solutions on soil erosion and water resources management: Perspectives from farmers. Proceeding of the NBS for Water management and climate adaptation conference; 2024 Jul. 3-5. Belgrade, Serbia: Bridging Science & Practice. <https://www.NbS4waterandclimate.eu/>
36. Staccione A, Broccoli D, Mazzoli P, Bagli S, Mysiak J. Natural water retention ponds for water management in agriculture: A potential scenario in Northern Italy. J Environ Manage. 2021; 292, 112849. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112849>
37. Paliaga G, Marchese A, Battini F, Vojinovic Z, Faccini F. A holistic approach to geo-hydrological risk mitigation in Mediterranean small catchments: from monitoring to NBS implementation. Proceeding of the NBS for Water management and climate adaptation conference; 2024 Jul. 3-5. Belgrade, Serbia: Bridging Science & Practice. <https://www.NbS4waterandclimate.eu/>
38. García M, Miguel P, Toro A. Nature Based Solutions: Towards a Socio-Technical Innovation for Water Security in Southwest Colombia. Proceeding of the NBS for Water management and climate adaptation conference; 2024 Jul. 3-5. Belgrade, Serbia: Bridging Science & Practice. <https://www.NbS4waterandclimate.eu/>
39. Peña MR, Van Ginneken M, Madera CA. Humedales de Flujo Subsuperficial: Una Alternativa Natural para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Zonas Tropicales. Ing. y Compet. 2003; 5(1):27-35. Disponible en: <https://doi.org/10.25100/iy.v5i1.2302>
40. Matamoros V, Caiola N, Rosales V, Hernández O, Ibáñez C. The role of rice fields and constructed wetlands as a source and a sink of pesticides and contaminants of emerging concern: Full-scale evaluation. Ecol. Eng. 2020; 156, 105971. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105971>.
41. Ofiera LM, Wintgens T, Kazner C. Pollution control through the removal of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) using pilot scale modified constructed wetlands. Proceeding of the NBS for Water management and climate adaptation conference; 2024 Jul. 3-5. Belgrade, Serbia: Bridging Science & Practice. <https://www.NbS4waterandclimate.eu/>

42. Castellanos-Estupiñán MA, Carrillo-Botello AM, Rozo-Granados LS, Becerra-Moreno D, García-Martínez JB, Urbina-Suarez NA. Removal of Nutrients and Pesticides from Agricultural Runoff Using Microalgae and Cyanobacteria. *Water (Switzerland)*. 2022; 14(4). Disponible en: <https://doi.org/10.3390/w14040558>
43. Thames21. Five Year Plan 2023-2028 [Internet]. Version 1.0. 2022. London, UK: Thames21, an independent environmental charity (Registered Number 1103997). Disponible en: [www.thames21.org.uk](http://www.thames21.org.uk)
44. El País. ¿Qué aves hay en Cali? Humedal de flujo superficial ubicado en el Parque de La Babilla. [Internet]. Cali, Colombia: Diario local de Santiago de Cali. [Actualizado 2023 Jul. 9, citado 2025 Febr. 27]. Disponible en: <https://www.elpais.com.co/cali/espectaculares-imagenes-humedales-los-mejores-lugares-para-pajarear-en-cali-0948.html>
45. Universidad del Valle. Informe técnico de evaluación de experiencias y tecnologías de la misión académica al Reino Unido. Proyecto "Contribución en la recuperación de la cuenca alta del río Cauca como sistema socio-ecológico mediante la mitigación de la contaminación puntual y difusa a través de Soluciones basadas en la Naturaleza", financiado por el Sistema General de Regalías de Colombia (SGR BPIN:2021000100492). 2024. Proyecto en ejecución por parte de la Universidad del Valle, en alianza con la Universidad Autónoma de Occidente y el Departamento Administrativo de Gestión de Medio Ambiente de la Alcaldía de Santiago de Cali. <https://mapainversiones.dnp.gov.co/Buscador/Index?id=2021000100492>
46. CVC. Un gran biofiltro ya está descontaminando la laguna de Charco Azul. [Internet]. Cali, Colombia: Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC. [Actualizado 2022 Jun. 29, citado 2025 Febr. 27]. Disponible en: <https://cvcambiental.blogspot.com/2022/06/un-gran-biofiltro-ya-esta.html>
47. Vymazal J. The Historical Development of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. In *Land*. 2022; 11(2). Disponible en: <https://doi.org/10.3390/land11020174>.
48. Alcaldía de Santiago de Cali, DAGMA, CVC, CALIDRIS. Humedales urbanos de Santiago de Cali. 2020. [Internet]. Cali, Colombia: Alcaldía de Santiago de Cali, DAGMA, CVC, CALIDRIS. [Actualizado 2020 En. 23, citado 2025 Febr. 27]. Disponible en: <https://ecopedia.cvc.gov.co/biodiversidad/humedales/humedales-urbanos-de-santiago-de-cali>
49. OMS. Naturaleza, biodiversidad y salud: una descripción general de las interconexiones. [Internet]. 2022. Copenhague, Dinamarca: Organización Mundial de la Salud. Oficina Regional de la OMS para Europa. Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. [Actualizado 2022, citado 2025 Febr. 27] Disponible en: <https://iris.who.int/handle/10665/352803>
50. Alcaldía de Santiago de Cali. Parque Ambiental Corazón de Pance. [Internet]. Cali, Colombia: Departamento Administrativo de Gestión de Medio Ambiente – DAGMA. [Actualizado 2022 Jun. 27, citado 2025 Febr. 27]. Disponible en: <https://www.cali.gov.co/dagma/publicaciones/156194/inicio-parque-ambiental-corazon-de-pance/>
51. Ferreira CSS, Kasanin-Grubin M, Solomun MK, Sushkova S, Minkina T, Zhao W. Wetlands as nature-based solutions for water management in different environments. In *Curr. Opin. Env. Sci. HI*. 2023; 33, 100476. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2023.100476>
52. RECONNECT. Synergy in Action: RECONNECT and the New EU Nature Restoration Law. [Internet]. RECONNECT (Regenerating ECOSystems with Nature-based solutions for hydro-meteorological risk rEduCTion). Horizon 2020. [Actualizado 2023 Dic. 14, citado 2025 Febr. 27]. Disponible en: <https://reconnectproject.medium.com/synergy-in-action-reconnect-and-the-new-eu-nature-restoration-law-f205a864888f>

53. Universidad del Valle. Proyecto "Contribución en la recuperación de la cuenca alta del río Cauca como sistema socio-ecológico mediante la mitigación de la contaminación puntual y difusa a través de Soluciones basadas en la Naturaleza", financiado por el Sistema General de Regalías de Colombia (SGR BPIN:2021000100492). 2024. Proyecto en ejecución por parte de la Universidad del Valle, en alianza con la Universidad Autónoma de Occidente y el Departamento Administrativo de Gestión de Medio Ambiente de la Alcaldía de Santiago de Cali. <https://mapainversiones.dnp.gov.co/Buscador/Index?id=2021000100492>
54. Yang J, Luo H, Wang H, Qin T, Yang M, Chen L. Removal effect of pollutants from stormwater runoff in shallow bioretention system with gramineous plants. *Wat. Sci. and Tech.* 2024; 89(8), 1946–1960. Disponible en: <https://doi.org/10.2166/wst.2024.111>.
55. Gerundo C, Pugliese F, De Paola F, Giugni M. An operational framework for NBS modelling and monitoring: outcomes from H2020 Phusicos Project. Proceeding of the NBS for Water management and climate adaptation conference; 2024 Jul. 3-5. Belgrade, Serbia: Bridging Science & Practice. <https://www.NbS4waterandclimate.eu/>
56. Pueyo-Ros J, Comas J. ModULar Tools for Integrating enhanced natural treatment SOrutions in URban water CYCLEs. Proceeding of the NBS for Water management and climate adaptation conference; 2024 Jul. 3-5. Bridging Science & Practice. Belgrade, Serbia. [www.multisource.eu](http://www.multisource.eu)
57. Rincón DA, Arteaga SM. (2022). Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) para la gestión del Cambio Climático en Colombia: Potencialidades y limitantes de implementación [Tesis especialización en gestión ambiental]. Antioquia, Colombia: Universidad de Antioquia. Disponible en: <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/dspace/handle/10495/29235>
58. SDA - Secretaría Distrital de Ambiente. Soluciones basadas en la naturaleza: claves para la gestión del recurso hídrico. Noticias de ambiente. [Internet]. Bogotá, Colombia: Secretaría Distrital de Ambiente. [Actualizado 2021 Ag. 12, citado 2025 Febr. 27]. Disponible en: [https://www.ambientebogota.gov.co/noticias-de-ambiente/-/asset\\_publisher/Fziya03up5Z6/content/soluciones-basadas-en-la-naturaleza-claves-para-la-gestion-del-recurso-hidrico](https://www.ambientebogota.gov.co/noticias-de-ambiente/-/asset_publisher/Fziya03up5Z6/content/soluciones-basadas-en-la-naturaleza-claves-para-la-gestion-del-recurso-hidrico)
59. Joel ES. Engagement of stakeholders: The key to finding adaptation strategies to climate-change-induced flood in the coastal environment. Proceeding of the NBS for Water management and climate adaptation conference; 2024 Jul. 3-5. Bridging Science & Practice. Belgrade, Serbia. [www.aul.edu.ng](http://www.aul.edu.ng).
60. Marchese, A., Vojinovic, Z., & Fonseca, A. Impacts and policy influence from the RECONNECT project. Proceeding of the NBS for Water management and climate adaptation conference, Bridging Science & Practice; 2024 Jul. 3-5. Belgrade, Serbia. <https://www.NbS4waterandclimate.eu/>
61. ECOHUB S.A.S. Modelo de gestión administrativo preliminar para las SBN. Proyecto "Contribución en la recuperación de la cuenca alta del río Cauca como sistema socio-ecológico mediante la mitigación de la contaminación puntual y difusa a través de Soluciones basadas en la Naturaleza", financiado por el Sistema General de Regalías de Colombia. 2023. Proyecto en ejecución por parte de la Universidad del Valle, en alianza con la Universidad Autónoma de Occidente y el Departamento Administrativo de Gestión de Medio Ambiente de la Alcaldía de Santiago de Cali. <https://mapainversiones.dnp.gov.co/Buscador/Index?id=2021000100492>
62. Mitic-Radulovic A. Co-creation in urban planning of Belgrade policy, governance issues and financing. Proceeding of the NBS for Water management and climate adaptation conference; 2024 Jul. 3-5. Bridging Science & Practice. Belgrade, Serbia. <https://www.NbS4waterandclimate.eu/>

63. Penny J, Dlugoborskyte V, Draper K, Fonseca A, Baker K, Chen AS. Innovating Nature-based Solutions: learnings from the EU Horizon 2020 RECONNECT project. *Blue-Green Syst.* 2024; 6(1), 114–130. Disponible en: <https://doi.org/10.2166/bgs.2024.048>
64. Figueroa-Arango C. Guía para la integración de las Soluciones Basadas en la Naturaleza en la planificación urbana. Primera aproximación para Colombia. Berlín: Alexander von Humboldt Stiftung, Ecologic Institute, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. 2020. Disponible en: <https://www.ecologic.eu/17623>
65. Dirección de Cambio Climático y Gestión de Riesgo, Álvarez E, Florián M, Peñuela LM, Cortes E, Escobar L. Guía de adaptación al cambio climático basada en ecosistemas en Colombia. 2018. 160 páginas. ISBN: 978-958-890-179-4. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. Disponible en: [https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/01/MADS\\_Guia\\_AbE\\_LIBRO\\_Digital-Cambio.pdf](https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/01/MADS_Guia_AbE_LIBRO_Digital-Cambio.pdf)
66. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Álvarez C, Chica F, Devia A, Ochoa MC, Trujillo L. Guía para la implementación de medidas de Reducción de Riesgo de Desastre basado en Ecosistemas. 2023. 109 páginas. Bogotá D.C., Colombia: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. ISBN 978-628-7598-15-7 (digital). Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/cambio-climatico-y-gestion-del-riesgo/reduccion-del-riesgo-basado-en-ecosistemas/>
67. DNP (2021). Estrategia de reactivación y repotenciación económica sostenible y resiliente. 2021. Bogotá, Colombia: Departamento Nacional de Planeación - DNP. Estrategia elaborada con asistencia técnica y financiera del NDC Partnership y del GIZ, en el marco de la iniciativa "Economic Advisory Support", para apoyar la planificación de la recuperación resiliente al clima en respuesta a la pandemia global COVID-19. Disponible en: [https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Estrategia\\_Reactivacion\\_Sostenible.pdf](https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Estrategia_Reactivacion_Sostenible.pdf)
68. Procuraduría General de la Nación, COSUDE. Guía de obligaciones ambientales para alcaldías y gobernaciones de Colombia. Bogotá D.C., Colombia: Procuraduría General de la Nación. Desarrollada con el apoyo de la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE) y del PNUD. Disponible en: <https://www.pactoglobal-colombia.org/biblioteca/publicaciones/medio-ambiente/territorios-sostenibles-guia-de-obligaciones-ambientales-para-alcaldias-y-gobernaciones-de-colombia.html>
69. CVC. Plan de Manejo Ambiental del complejo de humedales del alto río Cauca asociado a la laguna de Sonso. 2018. Designado como sitio RAMSAR (Valle del Cauca). [Internet]. Versión 1.0. Cali, Colombia: Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC. Dirección Técnica Ambiental, 2018. Disponible en: [https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/2019-02/PMA%20Sitio%20Ramsar\\_VF\\_web.pdf](https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/2019-02/PMA%20Sitio%20Ramsar_VF_web.pdf)