



Abril 2026

Nuevas oportunidades para la gestión sostenible del agua

Soluciones Basadas en la Naturaleza
(SBN)



FUNDACIÓN
RENOVABLES

Participantes en el proyecto

Jesús Godifredo Calvo. Colaborador.

Raquel Paule. Directora General. Fundación Renovables.

Maribel Núñez. Gerente. Fundación Renovables.

Ismael Morales. Responsable de políticas climáticas. Fundación Renovables.

Alexandra Llave. Responsable de redes y eventos. Fundación Renovables.

Juan Fernando Martín Romacho. Responsable de movilidad. Fundación Renovables.

María Manzano. Responsable de combustibles y mercados. Fundación Renovables.

Diego Ferraz. Responsable de cohesión territorial. Fundación Renovables.

Alejandro Tena. Responsable de Comunicación. Fundación Renovables.

Hannah Fakir. Responsable de incidencia política. Fundación Renovables.

Janire Sánchez. Responsable de educación y sensibilización. Fundación Renovables.

Gonzalo Gómez Álvarez. Responsable de tecnologías renovables. Fundación Renovables.

Teresa de la Fuente Espinosa. Administración. Fundación Renovables.

Luisa Andrea Castillo Pineda. Responsable de movilidad y ciudades. Fundación Renovables.



Esta publicación está bajo licencia Creative Commons. Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual (CC BY-NC-SA). Usted puede usar, copiar y difundir este documento o parte de este siempre y cuando se mencione su origen, no se use de forma comercial y no se modifique su licencia.

Fundación Renovables

(Declarada de utilidad pública)

Calle Santa Engracia 108, 5º Interior Izquierda.

28003. Madrid

www.fundacionrenovables.org

Este proyecto ha sido financiado por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto



Demográfico y será publicado en la web de la Fundación Renovables.

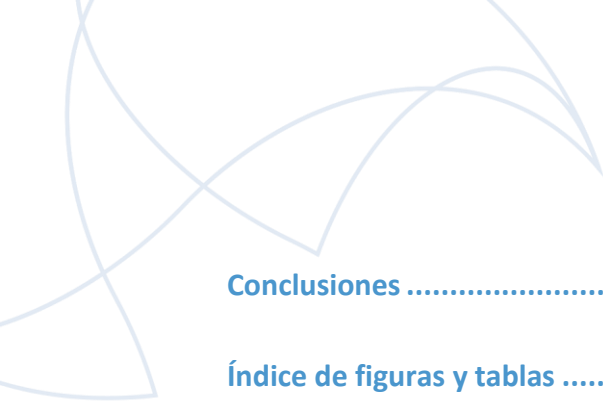




Índice

Soluciones Basadas en la Naturaleza	5
Estado de las masas de agua	5
Características de las SBN	8
Contexto actual de las Soluciones Basadas en la Naturaleza	13
Contexto histórico de las SBN	13
SBN vs infraestructura gris	16
Marco de desarrollo de las Soluciones Basadas en la Naturaleza	21
Situación actual	21
Mecanismos para impulsar la implantación de SBN.....	25
Grupos de trabajo activos en SBN	29
Revisión de Soluciones Basadas en la Naturaleza para el tratamiento de agua	34
Sistemas de infiltración	34
Lechos de infiltración rápida.....	35
Lechos de infiltración lenta.....	38
Sistemas urbanos de drenaje sostenibles.....	40
Fito y fitorremediación	43
Fitorremediación.....	44
Tratamiento con algas	46
Muros y techos verdes	47
Lagunaje	50
Laguna anaerobia.....	52
Laguna facultativa	54
Maduración	58
Humedales construidos	59
Flujo vertical	61
Flujo vertical tipo francés	62
Flujo horizontal	65
Flujo libre.....	67
Restauración ecosistemas naturales	68
Humedales naturales	71
Riberas y llanuras de inundación	73





Conclusiones	77
Índice de figuras y tablas	81
Índice de figuras	81
Índice de tablas	82
Bibliografía.....	84
Anexos	94



Soluciones Basadas en la Naturaleza

Nuevas oportunidades para la
gestión sostenible del agua



FUNDACIÓN
RENOVABLES

Soluciones Basadas en la Naturaleza

Estado de las masas de agua

Asegurar un buen estado de las masas de agua de un territorio es algo esencial para reforzar la seguridad hídrica a largo plazo, sobre todo, en un escenario donde el cambio climático hace que el agua sea un recurso cada vez más valorado a la vez que incierto, en cuanto a disposición temporal, espacial y de volumen. Los Estados miembros de la Unión Europea son conscientes de la **importancia de salvaguardar el agua** en términos cualitativos y cuantitativos y por ello existen numerosas estrategias enfocadas a ampliar y a asegurar la resiliencia hídrica europea (como el Pacto Azul Europeo o la Estrategia Europea de Resiliencia Hídrica, por citar algunos ejemplos recientes). Estas estrategias están acompañadas por textos legislativos que protegen este recurso, como la Directiva Marco del Agua, a nivel europeo, o el Texto Refundido de la Ley de Aguas, en el ámbito español.

Sin embargo, a pesar de que la protección de las masas de agua tiene un largo recorrido histórico (en 1991 se publica la Directiva 91/676/CEE del Consejo, de 12 de diciembre, relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos procedentes de fuentes agrarias), en España nos encontramos con que casi la mitad de los acuíferos se encuentran en mal estado (CSIC, 2024). En las siguientes imágenes extraídas del visor del MITECO (2025) se pueden ver a la izquierda las zonas que se marcaron como vulnerables en el informe cuatrienio de 2008-2011, mientras que a la derecha se muestran los puntos marcados como afectados por nitratos en 2022. Es decir, las zonas marcadas como vulnerables no solo no se han visto revertidas, sino que se han incrementado las zonas afectadas.

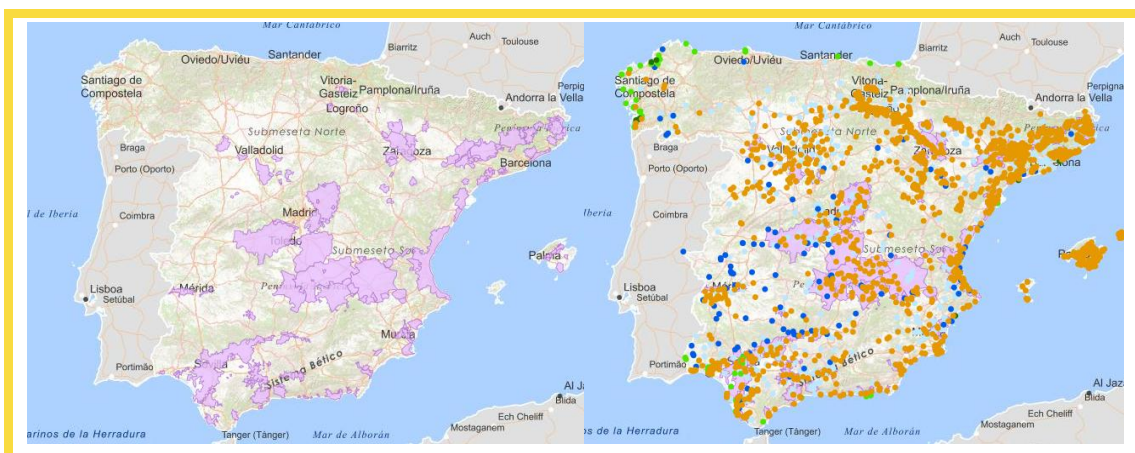


Figura 1. Zonas vulnerables a nitratos definidas en 2008 (izquierda) y masas de agua subterráneas afectadas por nitratos en 2022 (derecha).
Fuente: MITECO (2025).



Pero, las masas de agua no solo se ven afectadas a nivel cualitativo por problemas de contaminación por nitratos o episodios de eutrofización, sino que también se ven afectadas por la alta demanda del recurso hídrico. Según el [Atlas de Riesgos Hídricos](#) (AQUEDUCT, 2025), **una gran parte de las masas de agua de España se encuentra en una situación grave de estrés hídrico**. Es decir, la disponibilidad de agua de esas zonas puede verse comprometida en episodios de sequía, ya que la demanda es igual o superior a la tasa de reposición del agua, ya sea por precipitación o por escorrentía. Como cabría esperar, la predicción es que en el medio-largo plazo se vayan extendiendo las zonas delimitadas como de alto riesgo de estrés hídrico, debido a fenómenos asociados al cambio climático y la aceleración de sus efectos.

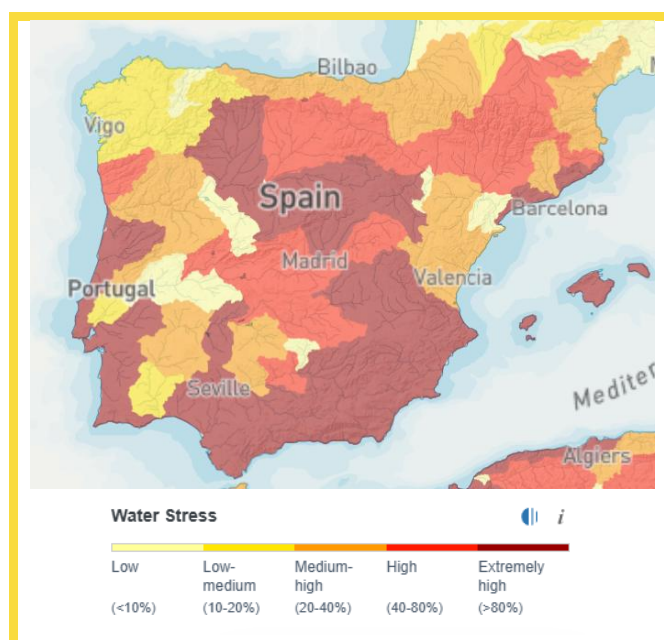


Figura 2. Nivel de riesgo de estrés hídrico en España.
Fuente: Atlas de Riesgos Hídricos (AQUEDUCT, 2025).

Este tipo de información y de hechos conducen a la conclusión de que, aunque es verdad que se está avanzando de forma constante en materia de depuración y en estrategias para asegurar la disponibilidad hídrica con herramientas como el Plan Nacional de Depuración, Saneamiento y Eficiencia, Ahorro y Reutilización (Plan DSEAR) o con cambios legislativos como el RD 1085/2024, por el que se aprueba el Reglamento de reutilización del agua y se modifican diversos Reales Decretos que regulan la gestión del agua, las estrategias convencionales de gestión hídrica no alcanzan los objetivos ambientales y de sostenibilidad que se desean ante los graves riesgos que tenemos por delante. Es por lo que, frente a las herramientas convencionales que, en algunos casos se muestran insuficientes o efectivas, pero no sostenibles, existe otra vía de actuación mediante **Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN)**.



Un claro ejemplo reciente de cómo se pueden combinar estrategias convencionales con aquellas basadas en la naturaleza lo encontramos en Quito, Ecuador. Hasta la fecha, todas las aguas residuales de la ciudad y alrededores (donde viven, aproximadamente, unos 2,6 millones de personas) se vertían directamente al río Machángara. Gracias al incremento de la sensibilización ambiental y al desarrollo de legislación que protege los elementos naturales, en 2024 el pueblo de Ecuador consiguió que el río Machángara sea un sujeto de derecho gracias a una sentencia judicial (Juicio No.17250-2024-00087, 2024) y, por lo tanto, a nivel legal pasó de ser un recurso natural o bien público y se le reconocieron derechos propios, al mismo nivel que una persona jurídica. Entre las obligaciones de esta sentencia se encuentra la recuperación de la calidad del río en un plazo de 10 años. Para ello, el gobierno de Ecuador está llevando a cabo diferentes estrategias, como la implantación de hasta 23 plantas depuradoras para tratar el agua de Quito. Sin embargo, la decisión judicial establece que las soluciones que se alcancen no pueden ser única y exclusivamente propuestas convencionales, sino que se deben evaluar e implantar tecnologías como biofiltros, humedales u otros, es decir, SBN. Gracias a este fallo judicial, Ecuador puede llegar a convertirse en un ejemplo en el que las SBN permiten restituir la calidad de las aguas allí donde las infraestructuras grises se muestran más débiles, como en zonas menos urbanizadas o de alto valor ecológico.

Recientemente, la ciudad de Quito ha aceptado 14 de las 27 propuestas establecidas inicialmente en la resolución (Expreso, 2025) y las principales labores de restitución que se están llevando a cabo son limpieza de riberas y retirada de residuos de gran tamaño (escombros, plásticos, etc.) dejando de momento sin ejecutar las soluciones técnicas acordadas (Quito Informa, 2025).



*Figura 3. Río Machángara al paso por Quito.
Fuente: Machado (2024).*



Características de las SBN

Aunque existen numerosos ejemplos en la historia del empleo de la naturaleza para solventar un problema o resolver una situación determinada, no fue hasta la década de los 2000 cuando se comenzó a plantear el concepto de Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN). Las primeras instituciones en concebir las SBN fueron la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) y el Banco Mundial. En este contexto, la UICN hacía mención a la necesidad de aplicar la combinación de tecnología gris con el conocimiento propio de la naturaleza para mejorar la protección, la gestión sostenible y la restauración de ecosistemas (UICN, 2000). Por su parte, el Banco Mundial, ya en 2008, publicó un compendio de diferentes actuaciones que ayudaban a proteger la biodiversidad y adaptación al cambio climático, destacando que la integración de SBN sería una forma costo-efectiva de garantizar servicios ambientales y sociales, a la vez que generaba beneficios económicos (*The World Bank*, 2008).

Estas dos referencias permiten ver la gran relevancia de las SBN, pues cumplen con un doble objetivo. Por un lado, son una herramienta fundamental para la conservación y restauración de ecosistemas de gran valor o degradados, debido a su destacado componente ambiental y social. Por otro, entidades como el Banco Mundial ponen de manifiesto que este tipo de actuaciones generan un doble beneficio. En primer lugar, porque al garantizar y restaurar servicios ambientales y sociales, como asegurar caudales ecológicos o garantizar disponibilidad hídrica y calidad de las masas de agua, se logra un desarrollo económico. En segundo lugar, este tipo de actuaciones no solo son correctivas, sino que tienen una componente preventiva y adaptativa, porque ayudan a minimizar los impactos por episodios eventuales y extremos, tales como crecidas, sequías u otro tipo de desastres naturales. Es decir, son soluciones costo-efectivas porque su aplicación genera más beneficio y desarrollo que la no actuación y la posterior restauración de zonas damnificadas.





Figura 4. Primeros conceptos asociados a las SBN.
Fuente: elaboración propia.

Aunque el concepto de SBN tuvo una buena aceptación y comenzó a ser un término empleado en artículos científicos y de manera oficial, no es hasta 2016 cuando encontramos una de las definiciones más aceptadas. Esta definición también viene de la mano de la UICN que las cataloga como:

- *Acciones para proteger, gestionar de manera sostenible y restaurar ecosistemas naturales o modificados que aborden los desafíos sociales de manera efectiva y adaptativa, proporcionando simultáneamente beneficios para el bienestar humano y la biodiversidad (Cohen-Shacham et al., 2016).*

Esta definición del ámbito más académico está en sintonía con otras ubicadas en documentos de carácter oficial como la Estrategia Nacional de Infraestructura Verde y de la Conectividad y Restauración Ecológicas (MITECO, 2021):

- *Son las estrategias, medidas y acciones que se apoyan en los ecosistemas y los servicios que estos proveen para responder a diversos desafíos de la sociedad como el cambio climático, la seguridad alimentaria o el riesgo de desastres. Se trata de utilizar las funciones de los ecosistemas para resolver los problemas que enfrentamos, en lugar de depender solamente de soluciones tecnológicas convencionales.*



O como la de la Comisión Europea (*The Nature Conservancy*, 2021):

- *Soluciones a desafíos a los que se enfrenta la sociedad que están inspiradas y respaldadas por la naturaleza; que son rentables y proporcionan a la vez beneficios ambientales, sociales y económicos y ayudan a aumentar la resiliencia.*

En términos generales, estas definiciones hacen alusión a la necesidad de combinar las tecnologías convencionales con estrategias tomadas de la propia naturaleza. Es decir, es necesario integrar dentro de la planificación y la gestión las SBN. Además, un aspecto importante es que estas SBN deben repercutir de forma positiva tanto a nivel ambiental como social y económico, ya que no se debe olvidar la viabilidad económica de estas actuaciones. Este matiz está en sintonía con la definición de **Mejor Técnica Disponible (MTD)** que establece la Directiva 2010/75/UE de emisiones industriales. En ella se especifica que para que una tecnología se pueda catalogar como MTD, debe alcanzar un alto nivel general de protección del medio ambiente en su conjunto, pero siempre considerando que sea técnica y económicamente viable.

De esta manera, las principales características de las SBN se podrían sintetizar en:

- **Prioridad de la conservación:** parten del cuidado y respeto a la naturaleza, asegurando que los ecosistemas se mantengan sanos y restituyendo aquellos que se encuentren degradados.
- **Flexibles:** pueden aplicarse solas o complementando a la tecnología gris existente.
- **Basadas en lo local:** se diseñan según las condiciones naturales y culturales de cada lugar, combinando ciencia y conocimientos tradicionales.
- **Con impacto social:** buscan beneficios justos y compartidos, promoviendo la participación de la comunidad.
- **Visión a largo plazo:** ayudan a mantener la biodiversidad y permiten que los ecosistemas evolucionen con el tiempo. Son estructuras duraderas por lo que se debe contemplar el desarrollo ecológico de la propia infraestructura.
- **Visión de conjunto:** se aplican a escala del paisaje, no solo en puntos aislados.
- **Equilibrio entre presente y futuro:** reconocen que hay que gestionar las ganancias inmediatas sin poner en riesgo los servicios de los ecosistemas a largo plazo.
- **Parte de las políticas públicas:** se integran en planes y estrategias para dar respuesta a los grandes retos sociales y ambientales.

Las SBN poseen una serie de ventajas frente a los sistemas convencionales, pero también presentan retos que no deben ser ignorados si se desea alcanzar los estándares de calidad del efluente requeridos. Principalmente, las ventajas de las SBN están enfocadas en su capacidad multipropósito y en la integración con el medio, mientras que sus puntos débiles se relacionan con los requisitos de espacio y la influencia de parámetros ambientales, como la radiación o la temperatura sobre los rendimientos de depuración. En la siguiente tabla se resumen las ventajas y retos más frecuentes asociados a las SBN.

Ventajas de las SBN	Retos o problemas que solventar
Proceso muy confiable que genera una buena calidad del efluente	Puede ser necesario combinarla con diferentes SBN o tecnología gris y multietapa para alcanzar los límites de vertido establecidos en zonas estrictas o sensibles
Adaptable según el clima y la ubicación	Alta demanda de área superficial en comparación con soluciones tecnológicas convencionales
Facilidad de construcción: se pueden utilizar materiales y emplear recursos naturales locales	Falta de conocimiento de las SBN, tanto de las diferentes tecnologías, rendimientos, campos de aplicación, como del diseño de estas
Requisitos operativos, de mano de obra, químicos y energéticos reducidos en comparación con tratamientos convencionales	Se pueden ver afectadas por la meteorología
Se puede aplicar para el tratamiento descentralizado	Hotel de lujo cinco estrellas
Funcionalidad multipropósito: ambientalmente amigable, con repercusión social y económica favorable	
Ayuda a mitigar otros problemas como los impactos de escasez de agua	
Incrementa la biodiversidad a diferentes escalas (desde grandes macrófitas a la flora microbiana)	

Tabla 1. Resumen las ventajas y retos más frecuentes asociados a las SBN.

Fuente: elaboración propia.



Contexto actual de las Soluciones Basadas en la Naturaleza

Nuevas oportunidades para la
gestión sostenible del agua



FUNDACIÓN
RENOVABLES

Contexto actual de las Soluciones Basadas en la Naturaleza

Contexto histórico de las SBN

Como se explicaba en el punto anterior, el concepto de SBN. comienza a definirse a partir de la década del 2000. Sin embargo, el apoyo en procesos que ocurren en la naturaleza para solventar problemas o retos a los que se enfrentan las sociedades tiene sus orígenes en épocas anteriores.

Ya incluso en civilizaciones antiguas, como Grecia o Roma, entre otras, se pueden ver casos en los que se empleaban las masas vegetales como agentes descontaminantes (*Andreas N. Angelakis & Joan B. Rose, 2014*). La principal diferencia con el uso actual de las SBN es que, mientras que ahora los humedales u otro tipo de barreras naturales con capacidad de depurar se diseñan con este objetivo, estas civilizaciones arrojaban purines y aguas residuales a campos de cultivos como abono y fertilizantes, siendo la depuración del agua algo fortuito y no intencionado. Algo similar ocurría en Europa en la Edad Media, cuando era frecuente verter las aguas fecales a ríos, marismas o humedales, confiando en la capacidad autodepurativa de las masas de aguas. Pero, en todos estos ejemplos, el ser humano empleaba los recursos naturales sin modificarlos o intervenir en ellos.

Sin embargo, tras la revolución industrial, que provocó un crecimiento demográfico, un mayor uso intensivo de los recursos y la generación de más residuos, esta capacidad autodepurativa de las masas de agua resultó insuficiente y comenzaron a propagarse enfermedades como el tifo o el cólera. Un ejemplo claro de esta situación lo encontramos en Londres en el siglo XIX, en un episodio llamado “El gran Hedor”. Debido a la acumulación de aguas residuales el Támesis se convirtió en una gran alcantarilla, dado que la carga de contaminación excedía la capacidad de depuración del río. Tras desatarse un brote de cólera por toda la ciudad y después de varios años sufriendo las consecuencias, se decidió realizar una gran obra de ingeniería que supondría el primer alcantarillado moderno, que, pocos años más tarde, se implantaría en otras ciudades con problemas similares, como fue el caso de París. Aunque esto supuso un paso en el saneamiento de las ciudades, evitando riesgos de salubridad e higiene, la solución no era definitiva, ya que se trasladaba el problema aguas abajo.





Figura 5. Ilustración realizada durante el periodo de Gran Hedor: “La muerte ronda sobre el Támesis”.
Fuente: García (2017).

No fue hasta el inicio del siglo XX cuando se comenzaron a desarrollar las diferentes estrategias de saneamiento tal y como las conocemos hoy. La primera **laguna de estabilización**, es decir, una laguna orientada a depurar el agua eliminando sólidos, materia orgánica y desinfectando, surgió de forma fortuita. Se observó que en lagunas con una baja capa de agua los sedimentos se iban al fondo, mientras que, gracias a la oxigenación, la materia orgánica iba decreciendo según pasaba el tiempo y, por otro lado, la acción de la radiación solar lograba desinfectar las capas superficiales de la masa de agua. Este descubrimiento derivó en un desarrollo del diseño de lagunas, con el objetivo de maximizar la depuración de las aguas residuales. También sirvió de base para empezar a estudiar los procesos involucrados en la depuración de aguas residuales que dieron lugar a los primeros estudios de procesos de depuración con fangos biológicos en el año 1914. Es decir, gracias al estudio de un proceso natural (que hoy catalogamos como SBN), se pudo comenzar a desarrollar e implantar sistemas de depuración convencionales tal y como los conocemos actualmente.

En este punto, las estrategias de depuración se bifurcan. Por un lado, se siguen desarrollando y optimizando los procesos de depuración dentro de un reactor biológico que, aunque estén basados en procesos naturales (crecimiento bacteriano y decantación), debido al alto grado de tecnificación y actuación del ser humano, no son considerados como SBN. Por otro lado, el desarrollo de humedales, lagunas y otras masas de agua como medios depurantes y filtrantes dio lugar a otro tipo de investigaciones. Especialmente, en la década de 1950-1960, la investigación y



desarrollo de estas tecnologías comenzó a incorporar el empleo de macrófitas (plantas de gran tamaño) como agentes activos de la depuración. Este nuevo planteamiento permitió desarrollar el concepto de humedales y lagunas más allá de su mera acción depurativa y comenzaron a considerarse un elemento clave en la conservación ambiental.




Figura 6. Combinación de procesos y elementos que pueden tener lugar en un proceso de depuración mediante lagunaje.
Fuente: modificado de International Bank for Reconstruction and Development & The World Bank (2021).

Actualmente conocemos una amplia variedad SBN de diferente escala de implantación (desde cubiertas vegetales, hasta sistemas de lagunajes completos para depurar grandes caudales o técnicas de manejo de pastoreo regenerativo), pero en lo que todas ellas convergen es en el uso de una combinación de cubiertas vegetales, medios naturales filtrantes y, en algunos casos, en consonancia con la intervención de otros organismos, desde mamíferos hasta bacterias. Aunque este tipo de actuaciones se han optimizado, se busca que la intervención del ser humano sea mínima para que la propia naturaleza, de forma pasiva, sea la encargada de los procesos de saneamiento y la que ofrezca los servicios ambientales.

La depuración de aguas residuales, a nivel global, ha apostado por el desarrollo de infraestructuras grises desde los años sesenta y setenta. Esta amplia implantación de las depuradoras permitió revertir la contaminación de las masas de agua, principalmente por vertidos asociados a actividades industriales y núcleos urbanos. Sin embargo, se está comprobando que las infraestructuras grises son insuficientes para los retos actuales. Por un lado, la mayor presión sobre los recursos hídricos y los mayores requisitos de calidad de los efluentes requieren de alternativas complementarias que permitan proteger en mayor grado la calidad y disponibilidad del agua. Asociado a esto, el agua ha pasado a ser un recurso esencial, a la vez que el origen de desastres naturales como riadas, por lo que su caudal debe regularse a lo largo del año en la medida que sea posible. Por último, la mayor sensibilización





ambiental de la sociedad demanda no solo soluciones técnicamente viables, sino que también sean compatibles con el entorno natural y ofrezcan beneficios sociales tangibles. Debido a la confluencia de todas estas necesidades, las SBN están cobrando cada vez más protagonismo, siendo un eje clave en el desarrollo de las políticas hídricas de la Unión Europea y de los países miembros.

SBN vs infraestructura gris

Las SBN y algunas infraestructuras grises comparten ciertas similitudes que pueden generar confusión a la hora de compararlas. De forma general, se podría decir que, aunque las SBN y algunas infraestructuras grises se basen en procesos naturales, como la actividad biológica, la decantación, la adsorción..., en las SBN estos procesos ocurren de forma integral y a un ritmo natural, mientras que en las infraestructuras grises los procesos se suelen compartimentar para maximizar su velocidad y así incrementar su capacidad de depuración. De forma más detallada, podemos encontrar las siguientes diferencias:

- **Mantenimiento:** las SBN suelen ser tecnologías simples, con bajo mantenimiento y sin necesidad de personal especializado, ya que se centran en que los procesos naturales actúen de forma autónoma o ligeramente dirigidos. Por su parte, las infraestructuras grises requieren de instrumentación, de control más exhaustivo y de personal técnico formado, para que las condiciones de operación se mantengan óptimas.
- **Energía:** debido a que en las SBN la intervención es mínima, el consumo energético y de reactivos suele ser más moderado que en el caso de las infraestructuras grises.
- **Impacto ambiental:** las SBN permiten integrar el paisaje junto con la depuración, a la vez que promueven la recarga de acuíferos, la biodiversidad, la fijación de carbono y otros servicios ecosistémicos. Las infraestructuras grises, por su parte, suelen generar residuos derivados del proceso de depuración a la vez que incompatibilizan su presencia con la de entornos con alto valor ecológico.
- **Adaptabilidad:** uno de los puntos clave de las SBN es su dependencia del contexto local. Las SBN deben adaptarse a la disponibilidad de recursos del terreno, al espacio disponible, al clima..., mientras que las infraestructuras grises suelen ser aplicables en casi cualquier entorno.



- Capacidad de depuración:** las SBN presentan un rendimiento suficiente para eliminar parámetros convencionales como la demanda química de oxígeno (DQO), nutrientes o sólidos suspendidos, pero por su forma de operar, los rendimientos se pueden ver alterados por la meteorología u otros aspectos naturales, como una afección a la comunidad vegetal, por ejemplo. Los rendimientos de las infraestructuras grises, debido a su alta tecnificación, son elevados incluso con contaminantes emergentes, pudiendo adaptar su funcionamiento en función del caudal y la carga contaminante.
- Resiliencia:** las infraestructuras grises son dependientes de energía, reactivos químicos y mano de obra, por lo que, ante episodios que dificulten alguno de estos puntos (cortes eléctricos, fallos en el suministro, dificultad de acceso...), su rendimiento puede verse gravemente afectado. Las SBN, en cambio, pueden seguir operando ante cortes de suministro eléctrico o, incluso, durante periodos espaciados de mantenimiento.

Estas diferencias se pueden apreciar mejor comparando dos ejemplos. Por un lado, un proceso típico de depuración con infraestructura gris, como es la depuración con fangos activos, la tecnología más extendida en las estaciones de depuración de aguas urbanas (EDAR), y, por otro, un esquema convencional de las SBN, el lagunaje. En ambos modelos el objetivo es el mismo: reducir la presencia de sólidos suspendidos, de materia orgánica y nutrientes y conseguir una desinfección final. En la Figura 6 se muestran los dos esquemas.

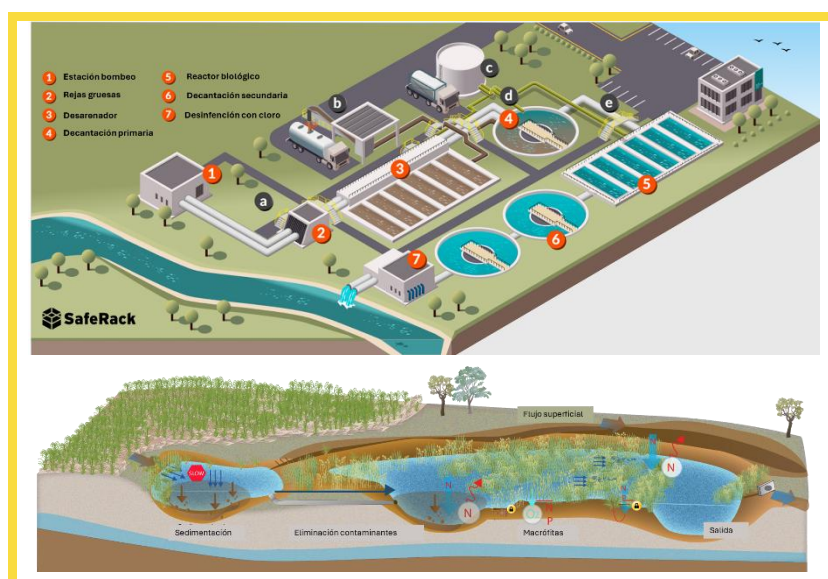
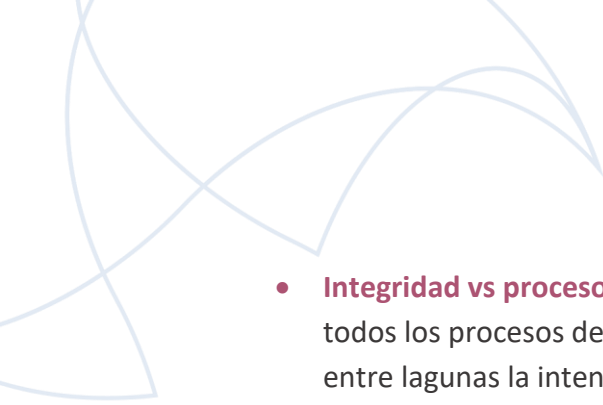
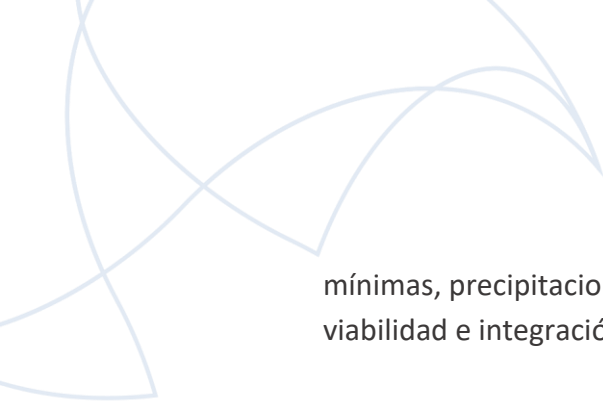


Figura 7. Superior: esquema convencional del proceso de depuración de aguas residuales. Modificado de (SafeRack, 2025). Inferior: proceso de lagunaje. Fuente: modificado de Queensland Government (2022).



- 
- **Integridad vs proceso unitario:** lo primero que destaca es que en el lagunaje todos los procesos depurativos tienen lugar de forma simultánea, cambiando entre lagunas la intensidad con la que se espera un proceso. Sin embargo, en el esquema de la depuradora convencional, cada etapa de la depuración ha sido diseñada para llevar a cabo un único proceso depurativo, pero con la máxima eficacia posible. De hecho, si en alguna etapa ocurren varios procesos de forma simultánea, suele deberse a problemas en la operación. Por ejemplo, si en el reactor biológico se decantan los sólidos, estos pueden obstruir las soplantes que aportan oxígeno al proceso. O, si hay actividad biológica en la decantación, el manto de fango puede flotar y no separarse correctamente.
 - **Mantenimiento:** mientras que el lagunaje requiere de actividades de control de la vegetación y extracción de sólidos de la laguna anaerobia para evitar su colmatación, en el caso de la EDAR es necesaria una actividad continua para el mantenimiento de bombas y ajustes de caudales internos y purgas para mantener los niveles de depuración, de gestión diaria de los residuos generados en las diferentes etapas del proceso, etc.
 - **Energía:** en los sistemas de lagunaje se suele evitar, en la medida de lo posible, los consumos energéticos, ya que el agua fluye por gravedad y la energía de los procesos suele ser suplida con energía solar. En una EDAR es necesario aportar energía en todas y cada una de las etapas, ya sea en la decantación (para la extracción de lodos y posterior deshidratación), en el proceso biológico (para inyectar aire al reactor) o en la desinfección (suelen emplear lámparas de luz ultravioleta -UV).
 - **Impacto ambiental:** en este caso, los sistemas de lagunaje pueden actuar como ecosistema de agua dulce permitiendo el desarrollo de actividades biológicas, tanto en las riberas como en la propia masa de agua. También actúa como elemento del paisaje, pudiendo ser parte activa de procesos de educación ambiental. Por su parte, el principal impacto de la EDAR es la reducción de carga contaminante al medio acuático receptor.
 - **Adaptabilidad:** el esquema EDAR ha sido ampliamente implantado. Se encuentra en climas fríos, templados o calientes y para todo tipo de escalas de instalación, principalmente en instalaciones de media y alta capacidad de tratamiento. Por su parte, los lagunajes, aunque parten de un esquema general, deben adaptarse a múltiples cuestiones del entorno, como la permeabilidad del terreno, el tipo de vegetación, temperaturas máximas y





mínimas, precipitaciones..., haciendo necesario un estudio profundo de viabilidad e integración en cada caso.

- **Capacidad de depuración:** este esquema de EDAR permite reducir los niveles de contaminación hasta niveles cercanos a cero por lo que son recomendables para zonas sensibles a la eutrofización. Además, el basarse en procesos unitarios permite reforzar etapas con bajos rendimientos o ampliar el tren de tratamiento a nuevos contaminantes. Por su parte, el lagunaje se puede ver afectado por un periodo de precipitaciones intenso, haciendo que el caudal exceda su capacidad de depuración, por bajas temperaturas que reduzcan la actividad biológica depurante, por vientos intensos que mezclen las capas de agua de las primeras lagunas, etc.

Viendo estas diferencias ambos sistemas son claramente complementarios. Es posible apoyar la depuración de aguas residuales con infraestructuras grises, que aseguren la calidad de los efluentes con cierta independencia de los parámetros climatológicos y otras posibles afecciones ambientales, con sistemas con menos impacto ambiental y que ofrecen una amplia variedad de servicios ecosistémicos.

Además, en aquellos contextos donde no se pueda instalar una infraestructura gris (por falta de mano de obra cualificada, de suministros...), no sea necesario alcanzar un nivel de depuración elevado o se requiera mejorar la regulación de la disponibilidad hídrica (tanto por periodos de sequía como por episodios de inundaciones), las SBN se muestran como una solución completa. Al implementar las SBN se incrementa la resiliencia hídrica, se pueden restaurar funciones ecosistémicas y se favorece la biodiversidad.



Marco de desarrollo de las Soluciones Basadas en la Naturaleza

Nuevas oportunidades para la
gestión sostenible del agua



FUNDACIÓN
RENOVABLES

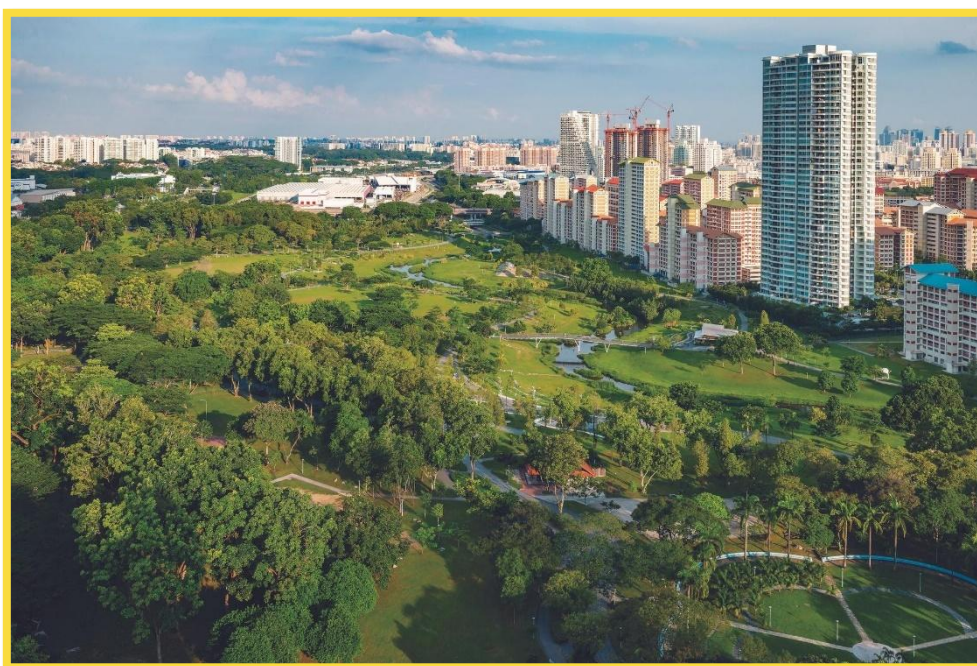
Marco de desarrollo de las Soluciones Basadas en la Naturaleza

Situación actual

Tal y como se recoge en el informe *“Nature-based solutions in Europe: Policy, Knowledge and practice for climate change adaptation and disaster risk reduction”* (European Environment Agency, 2021), las SBN son una herramienta clave con la que cuenta la Unión Europea (UE) para mitigar y adaptarse a los efectos del cambio climático. Aunque a largo del documento se recogen diferentes SBN relacionadas con bosques, agricultura, costas, ciudades y gestión del agua, cabe destacar que el agua aparece en todos y cada uno de los apartados, debido a su carácter transversal.

En diferentes fuentes bibliográficas podemos encontrar ejemplos diversos de SBN aplicadas tanto en España y Europa, como en otros países. Las soluciones más implantadas suelen estar relacionadas con renaturalizar zonas urbanas con el fin de mejorar la regulación de subidas y bajadas del nivel de los ríos, aportar refugios climáticos con abundante sombra, así como propiciar un ecosistema adecuado para la flora y fauna de las ciudades. Ejemplos de estas actuaciones los podemos encontrar en el proyecto **URBAN GreenUP** llevado a cabo en el río Esgueva a su paso por Valladolid. Este proyecto europeo buscaba desarrollar y replicar una metodología de renaturalización urbana en varias ciudades europeas y no europeas, mediante implementaciones técnicas como sistemas de drenaje sostenibles o filtros verdes para el tratamiento de agua para el riego del propio espacio verde plantado. Fuera de Europa otro ejemplo es el del parque Bishan-Ang Mo Kio, en Singapur, donde se transformó una gran extensión impermeable de hormigón en uno de los mayores parques fluviales del sudeste asiático.





*Figura 8. Parque Bishan-Ang Mo Kio.
Fuente: Ramboll (2012).*

En el ámbito fluvial, las actuaciones que más se han desarrollado han sido aquellas relacionadas con el mantenimiento y la ampliación de humedales, debido a que son ecosistemas que tradicionalmente se han visto muy alterados y estaban en una situación de conservación crítica. Estas zonas tienen un papel muy importante en la captura de carbono, ya que suelen ser zonas con una alta biodiversidad que ayudan a laminar el régimen hídrico, a la vez que son un punto de recarga de acuíferos. En este sentido, España publicó su Plan Estratégico de Humedales a 2030 en 2022, y en él las SBN son protagonistas en las líneas de actuación principales de las zonas prioritarias de actuación establecidas como el Mar Menor, Doñana, la Albufera de Valencia o el Delta del Ebro, entre otras. A nivel europeo podemos encontrar ejemplos similares, como el caso del Humedal Oroklini, en Chipre, que llegó a desecarse en 1940 para evitar la propagación de ciertas enfermedades a través de mosquitos (práctica prohibida actualmente, pero que fue habitual en Europa, incluida España). Hoy, gracias a proyectos de conservación financiados por la UE, como los proyectos LIFE, este entorno natural alberga una gran población y diversidad de aves, habiéndose identificado 190 especies.






Figura 9. Fotografía del humedal Oroklini.
Fuente: Oroklini Project (2014).

Sin embargo, las actuaciones relacionadas directamente con el tratamiento de aguas residuales urbanas, agroganaderas e industriales no han sido tan exploradas ni implementadas por diversos motivos que desglosamos a continuación:

- Una buena parte de esta menor implantación puede atribuirse a un **factor cultural y de base de conocimiento**. Tradicionalmente, las personas especialistas en el tratamiento de las aguas residuales provenían de formaciones relacionadas con el ámbito “ingenieril”, como ingeniería de caminos o ingeniería civil, por lo que tienen un bagaje y un sesgo hacia soluciones más técnicas y mecánicas. No obstante, la apertura del sector a nuevos enfoques, la sensibilidad ambiental y las necesidades climáticas están generando una tendencia creciente a valorar los tratamientos basados en la naturaleza como un mecanismo de acción más.
- Por otro lado, mientras que las soluciones aplicadas en regímenes fluviales o zonas urbanas están orientadas, por ejemplo, a mejorar la calidad de estos ecosistemas y a aportar un mayor grado de protección y conservación, **el tratamiento de las aguas residuales se rige por una normativa rígida y estricta que regula la calidad de vertido de las aguas tras la depuración**. Debido al mayor grado de desconocimiento de las SBN frente a las tecnologías convencionales, no solo en cuanto a su funcionamiento, sino también a la falta de ejemplos de casos de éxito, tradicionalmente se ha apostado por tecnologías más robustas que, aunque puedan ser más costosas de implantar y mantener, han aportado una mayor seguridad y confianza con relación al cumplimiento de vertido. Las nuevas normativas rompen una lanza a favor de las SBN demostrando que las tecnologías convencionales pueden presentar ciertas limitaciones a la hora de alcanzar los grados de exigencia en la





depuración del agua o consiguiéndolos con un elevado consumo energético, mientras que las SBN se muestran como un buen complemento en las etapas de afino posterior. Además, la integración de aspectos ambientales (restitución y conservación) en el esquema de depuración se ve condicionada por la presencia de SBN.

- Por último, el aspecto económico también juega un papel importante. Mientras que las soluciones aplicadas a nivel público pueden ser costeadas mediante subvenciones (principalmente europeas) y su implantación se puede justificar por el beneficio social y ambiental aportado, la industria debe asumir un mayor riesgo de capital frente a este tipo de actuaciones (aunque, como se verá más adelante, existen diferentes mecanismos de financiación y subvención pública). **Pese a que la industria también puede considerar los posibles efectos positivos sociales y ambientales de las SBN, es más complicado de cuantificar a nivel económico como para justificar su elección frente a otro sistema más tradicional.** Además, la falta de estandarización y de referencias dificulta los análisis tecno-económicos preliminares a la hora de tomar decisiones, provocando que la industria confíe más en sistemas convencionales.

Con toda esta información se podría concluir que, aunque la UE ha puesto el foco en las SBN como una de las herramientas clave para la gestión hídrica en el territorio europeo, es necesario vencer ciertas barreras y retos que actualmente existen, con el fin de poder generalizar su implantación. A modo de resumen, se podrían identificar los siguientes retos:

- **Existencia de mecanismos claros de financiación para la** implantación de las SBN, tanto a nivel público como privado, que permitan generar experiencias positivas de implantación para animar y fomentar su aceptación en los entornos evaluados.
- Poder identificar objetivos claros a la hora de implementar SBN, así como **poder obtener parámetros de seguimiento y de operación** que se puedan estandarizar o que sean fácilmente comparables.
- Seguir trabajando en la **difusión de los casos de éxito de las SBN** para poder superar las barreras sociales a la hora de tomar decisiones por parte de los agentes responsables.



- Con el fin de establecer objetivos prioritarios, se deben **marcar áreas preferentes de actuación y establecer guías u hojas de ruta** para poder abordar con éxito estos retos, buscando en todo momento la sinergia entre distintas tecnologías.

Mecanismos para impulsar la implantación de SBN

La UE es consciente de que tiene que superar estos retos para poder generalizar y ampliar la implantación de SBN. Por este motivo, lleva varios años ampliando su estrategia de gestión hídrica, así como incorporando nuevos mecanismos de financiación que incluyan a las SBN entre las posibles actuaciones beneficiadas. Centrando el análisis en las publicaciones más recientes de la UE cabe destacar el **Pacto Azul Europeo**. Este documento pretende emular al Pacto Verde Europeo (2019) en el que se establecieron los principios y las líneas de actuación de la UE para alcanzar la neutralidad climática en 2050. Desde 2023 se está trabajando en este Pacto Azul (*EU Blue Deal*, en inglés), pero actualmente solo se dispone de una declaración por el Pacto Azul Europeo en la que se recogen 15 principios que deberán guiar las futuras iniciativas de la UE en materia de gestión hídrica, acompañadas de 21 acciones concretas y urgentes (*European Economic & and Social Committee*, 2023). De entre ese conjunto de principios y acciones, destacamos los siguientes puntos en relación con las SBN:

- **Principio 2:** la restauración y protección de los ecosistemas, los humedales y la biodiversidad deben constituir una parte esencial del Pacto Azul.
- **Principio 4:** los servicios de agua, saneamiento e higiene deben ser sostenibles, equitativos, de elevada calidad y asequibles para todas las personas.
- **Acción 4:** las infraestructuras y los recursos hídricos de cada Estado miembro deben ser objeto de una evaluación inmediata y exhaustiva para determinar las necesidades urgentes de inversión.
- **Acción 11:** la UE debe acelerar sus esfuerzos en pro de la creación de una comunidad de conocimiento e innovación para el agua en el seno del Instituto Europeo de Innovación y Tecnología (EIT).
- **Acción 16:** el Fondo de Transición Azul apoyará infraestructuras resilientes y una gestión sostenible del agua, además de la investigación y la adopción de tecnologías eficientes en el uso del agua.





Figura 10. Logo del Pacto Azul Europeo.
Fuente: European Economic & and Social Committee, (2023).

De forma general, el Pacto Azul Europeo instará a revisar las políticas de la UE en materia de agua, reforzando la necesidad de actualizar tanto sus ejes de actuación como las líneas de financiación. Esta declaración ya se está llevando a la práctica. Por ejemplo, a principios de 2025 el EIT lanzó una convocatoria para que diferentes entidades pudieran formar parte del *Kick Water* (Acción 11, anteriormente citada) (Horizonte Europa, 2025), un conjunto de entidades de diversa naturaleza para impulsar la innovación en materia de agua, tanto en lo relacionado con la economía circular, como en la protección de ecosistemas hídricos (lagos, ríos y océanos) o la mitigación de impactos climáticos asociados con el agua (sequías, riadas y escasez hídrica). En noviembre de 2025 se seleccionaron las entidades que formarán parte de este *Kick Water* durante 7 años (EIT, 2025).

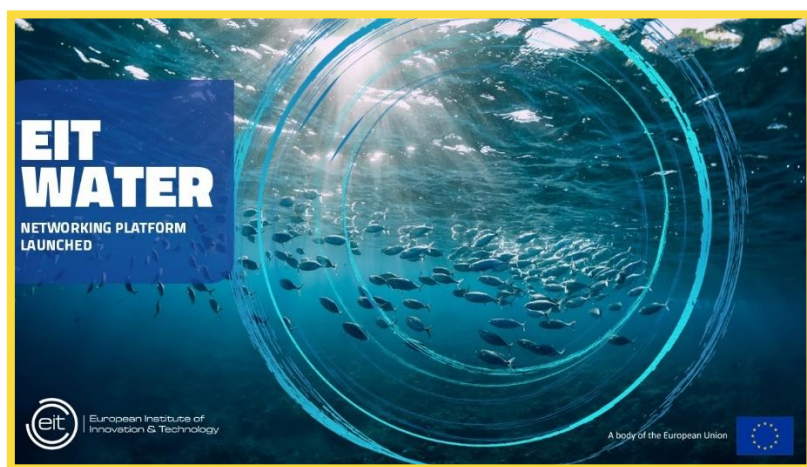


Figura 11. Logo del EIT Kick Water.
Fuente: EIT (2025).



Además de esto, y también en relación con el Pacto Azul Europeo, en 2024 se presentó una **Iniciativa Europea Ciudadana (ICE)**, cuyo plazo de recolección de firmas terminó en octubre de 2025, para que la UE elabore un plan de acción estratégico y holístico para el agua en Europa. En el ICE se señalan las infraestructuras híbridas verdes y grises, las SBN y las herramientas digitales como elementos claves del futuro del agua en la UE (*ICE4Water, 2024*).

Estas líneas de actuación que vienen guiadas por el Pacto Azul Europeo han seguido desarrollándose en diferentes publicaciones, como la Estrategia Europea de Resiliencia Hídrica (2025). En este documento se recogen los principales objetivos de la UE relacionados con el agua y concretiza algunas acciones que deben llevarse a cabo o desarrollarse en mayor medida. A continuación, destacamos aquellas que se han considerado más relevantes en relación con las SBN:

- En relación con los modelos de desarrollo urbano, el texto cita la **necesidad de fomentar la «ciudad esponja» que utilice SBN para absorber y liberar el agua de manera controlada**. Destaca que de aquí a 2033 todas las ciudades de la UE con más de 100.000 habitantes establecerán **planes integrados de gestión de las aguas residuales urbanas que den prioridad a las SBN** y a las infraestructuras verdes y azules.
- También resalta que **la gestión hidrológica debe priorizar las SBN**, tanto por separado como en combinación con infraestructuras grises.
- En materia de inversión, a **partir de 2026 se incrementará la financiación pública y privada de proyectos relacionados con las SBN** que mejoren el acceso al agua, el control de la contaminación y la resiliencia. Esto se hará en parte mediante el BEI (Banco Europeo de Inversiones) creando un nuevo instrumento de asesoramiento sobre el agua sostenible.
- **La UE ampliará las asociaciones estratégicas y la diplomacia del agua** para fomentar una gestión integrada de los recursos hídricos, el uso de SBN y la inversión en agua y saneamiento sostenibles.

En esta misma línea encontramos el documento **“The future of water availability and use in the EU”**, publicado en abril de 2025, en el que se exponen diferentes escenarios para Europa (años 2030 y 2050) en materia de disponibilidad hídrica (*European Parliamentary Research Service, 2025*). Para todos los escenarios previstos, este documento destaca el papel de las SBN junto con otros actores, como las herramientas digitales para la toma de decisiones o la apuesta por la investigación y la innovación. En este sentido, se señala la necesidad de incrementar la financiación para la implantación de las SBN, siempre y cuando se pueda justificar que estas permiten



mejorar la calidad de ecosistemas acuáticos y terrestres, junto con un mayor impulso a la innovación en soluciones tecnológicas y SBN para hacer frente a la escasez y la sequía. Además, en este documento se identifican algunos riesgos o retos que superar por parte de las SBN como la falta de conocimientos técnicos o de capacidad en algunos Estados miembros para implantar SBN o infraestructuras hídricas modernas.



Figura 12. Principales ejes de actuación en materia de resiliencia hídrica en la Unión Europea.
Fuente: Traducido de European Parliamentary Research Service (2025).

Como se aprecia a través de estos ejemplos recientes, la UE es consciente de las limitaciones actuales en cuanto a la implantación de las SBN, pero no quiere desprenderse de esta herramienta transformadora. Como hemos visto, se están impulsando cambios que permitan integrar las SBN como parte de las soluciones a llevar a cabo para solventar los retos relacionados con el agua, tanto en el largo plazo como en el futuro inmediato. Como ejemplo de medidas concretas, tanto a nivel público como privado, podemos citar las ayudas de financiación para empresas agroalimentarias del PERTE-AGRO3 (SEPIDES), que recoge entre las líneas de financiación prioritarias a los proyectos con carácter innovador destinados a la protección del medio ambiente. En el ámbito público, cabe mencionar el buscador de proyectos subvencionados que ha desarrollado el Institut de Ciència i Tecnologia Ambientals (ICTA-UAB), con el que se pueden buscar los proyectos realizados o en ejecución en España por contexto geográfico o por temática.





Figura 13. Captura del buscador de proyectos con SBN.
Fuente: ICTA-UAB (2025).

Grupos de trabajo activos en SBN

Como se ha mostrado en el apartado anterior, una buena parte de la implantación de nuevas BN se está canalizando a través de proyectos subvencionados (principalmente a nivel europeo), tanto para aquellos que tienen una aplicación directa en la industria como para los que buscan transformar espacios públicos. Estas acciones son necesarias para poder ir ampliando el número de casos de éxito e ir conociendo con datos reales el comportamiento, rendimiento, límites operacionales, etc. de las diferentes SBN en entornos o contextos distintos. Sin embargo, para que las SBN formen parte de las herramientas de las que disponemos para solventar los retos hídricos ha sido necesario el esfuerzo de diferentes grupos de trabajo, fundaciones, comisiones... que han logrado acercarlas a los diferentes agentes implicados (instituciones, sociedad y empresas). Estas entidades, de distinta naturaleza, siguen en activo promoviendo e impulsando el conocimiento de las SBN, por lo que son agentes clave para mantenerse informado y actualizado en materia de SBN.

A nivel internacional, entre las entidades más reconocidas, se puede destacar la **Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN)**. Como se ha mencionado, este organismo fue uno de los promotores de la definición que conocemos hoy de las SBN. En la actualidad, el tema se coordina desde el grupo de trabajo temático de SBN, que realiza labores de síntesis de casos de éxito, analiza los retos presentes para la



implantación de estas soluciones, evalúa diferentes intervenciones en contextos geográficos distintos, organiza congresos sobre esta temática... Todas las publicaciones más recientes se pueden encontrar en su página web (UICN, 2025).

Con un enfoque más científico y técnico está el reciente **clúster de SBN formado por la IWA (International Water Association)** (IWA, 2025). Aunque esta red de expertos y expertas en el campo del agua llevan años divulgando y desarrollando el conocimiento en materia de SBN, recientemente han formado un clúster para abordar tres grandes objetivos en relación con estas herramientas:

- Promover SBN sólidas y con base científica en todo el ciclo del agua.
- Evitar el uso indebido de la terminología SBN y reducir el *greenwashing*.
- Fomentar enfoques integrados para el intercambio de conocimientos, la innovación y la orientación política.

Una gran ventaja de esta red radica en su amplia extensión geográfica y en la diversidad de perfiles que la forman, pudiendo abordar las SBN desde múltiples perspectivas y enfoques.



Figura 14. Logos de la UICN y la IWA.
Fuente: UICN (2025) e IWA (2025).

A nivel europeo podemos identificar también una amplia variedad de actores, como el **Grupo de Trabajo en infraestructura verde-gris y SBN de la Water Europe**. Este grupo busca hacer de nexo entre diferentes agentes implicados en el desarrollo de las SBN, así como promover espacios de divulgación, encuentro y formación en esta materia.

Centrándonos en España, identificamos a la **Fundación Conama y su Grupo de Trabajo específico en SBN**, que se formó en 2018 y desde entonces han publicado diferentes documentos de trabajo y guías para orientar el conocimiento en este campo y actualizar los casos de éxito. Sin embargo, si se quieren consultar fuentes más específicas del campo del abastecimiento y la depuración de aguas, encontramos



entidades como la Asociación Española del Agua Urbana (DAQUAS) o la Plataforma Tecnológica Española del Agua (PTEA). En **DAQUAS**, entidad recientemente formada de la unión de la Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento (AEAS) y la Asociación Española de Empresas Gestoras de los Servicios de Agua Urbana (AGA), encontraremos diferentes comisiones técnicas de trabajo específicas en abastecimiento, depuración, captación..., todas ellas relacionadas por Grupos de Trabajo transversales de descarbonización o I+D+i, entre otros. Aunque no hay un apartado específico para las SBN, esta entidad frecuentemente organiza espacios de encuentro como foros o congresos con relación a las SBN, promueve proyectos en esta materia y, sobre todo, sirve de nexo entre otras entidades, canalizando el conocimiento y las experiencias en este campo. Con un punto de vista más técnico identificamos a la **PTEA**. Esta iniciativa, impulsada por AEAS, entre otras entidades, trabaja en beneficio de las empresas del sector, los centros tecnológicos, las universidades y las administraciones e instituciones públicas para impulsar la innovación en el sector del agua. De entre sus diferentes Grupos de Trabajo cabe destacar el relacionado con ecosistemas y biodiversidad (Grupo de Trabajo 2), ya que es en el que se abordan todas las cuestiones relacionadas con las SBN, organizando talleres de formación en esta materia o visitas de expertos del sector del agua a casos de éxito como herramientas de aprendizaje.



Figura 15. Fotografía del 14 Congreso Nacional de Medio Ambiente en el que se fundó el grupo de trabajo específico de SBN.

Fuente: Fundación Conama, 2025.

Estos espacios de desarrollo y trabajo también tienen su lugar a nivel territorial. A modo de ejemplo se podemos citar al **Instituto de Investigación del Agua y Medio Ambiente de la Universitat Politècnica de València (IIAMA)**. Esta entidad aglutina hasta 12 grupos de investigación, siendo uno de los ejes centrales de desarrollo científico en materia de agua y medio ambiente de España. Esta red abarca el conocimiento científico y técnico en materia de tratamiento de agua, biodiversidad microbiana, tecnología forestal, hidrogeología, redes hidráulicas, etc. Es decir, en este instituto se profundiza y avanza



en el conocimiento de los ejes y líneas de actuación de las SBN. Tanto es así que uno de los grupos de investigación está enfocado íntegramente en el conocimiento y la investigación de las SBN, habiendo trabajado, sobre todo, en espacios naturales de Valencia, como la Albufera. Entre los diferentes proyectos de investigación que están llevando a cabo, el ***Nature-based solution services promoting local biodiversity, well-being and scalable solution*** (NBSPLUS) tiene como objetivo desarrollar y planificar servicios de las SBN para promover la biodiversidad local, el bienestar, la justicia y la resiliencia climática.



Figura 16. Logo del IIAMA (2025) y del proyecto NBSPLUS (2025).



**Revisión de Soluciones
Basadas en la Naturaleza para
el tratamiento de agua**

**Nuevas oportunidades para la
gestión sostenible del agua**



**FUNDACIÓN
RENOVABLES**

Revisión de Soluciones Basadas en la Naturaleza para el tratamiento de agua

A la hora de detallar y explicar las SBN es posible emplear diferentes clasificaciones en base a determinados aspectos diferenciadores o comunes entre ellas. Por ejemplo, se podría establecer una clasificación en base al tipo de ecosistema del que se trata (o pretende emular), ya sea una ribera, un humedal, una laguna o un sistema más artificial. También se podrían enumerar las soluciones en función de su grado de antropización o teniendo en cuenta qué contaminantes elimina o reduce y en qué proporción.

Para facilitar la lectura y comprensión, en este caso se han agrupado las tecnologías en función del mecanismo de actuación. Sin embargo, cabe destacar que las SBN se caracterizan por la acción de múltiples actores y mecanismos de forma simultánea. Por ello, inicialmente se presentan dos grupos de SBN con mecanismos más acotados (la infiltración, por un lado, y la fito y ficorremediación, por otro) para, posteriormente, poder entender mejor otras SBN que combinan múltiples mecanismos en mayor o menor grado.

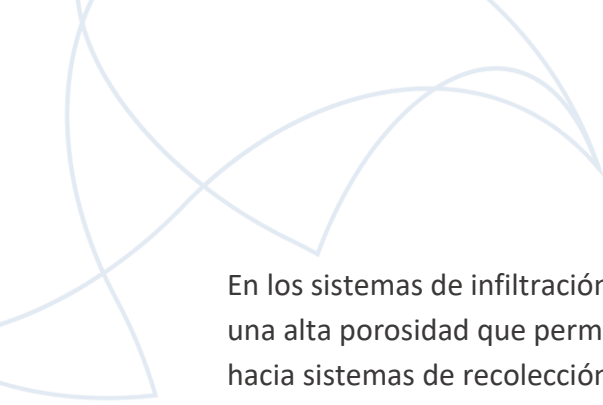
Para cada una de las soluciones expuestas se describen algunos aspectos destacados: los principios de funcionamiento, cuáles son los contaminantes tratados, el grado de madurez tecnológica, los beneficios ambientales y sociales, las ventajas frente a otros sistemas, las limitaciones (aspectos relacionados con la necesidad de espacio, carga de contaminantes a la entrada, dependencia del clima...) y otras cuestiones relacionadas con su mantenimiento. Por último, se mencionan casos de éxito destacando su ámbito de aplicación.

En el Anexo de este informe se pueden encontrar las fichas resumen con la información más relevante de cada SBN (o grupos de SBN afines).

Sistemas de infiltración

El primer conjunto de tecnologías que se describe son aquellas basadas en la infiltración del agua a través de un medio poroso como es el suelo. Esta solución puede aplicarse de forma aislada, como tratamiento único, o también puede integrarse dentro de un sistema más complejo que incorpore diferentes tratamientos. Aunque estos sistemas pueden ayudarse del desarrollo vegetativo sobre el suelo, edafológicamente el núcleo del tratamiento radica en la composición del suelo.





En los sistemas de infiltración el agua se descarga sobre una capa de suelo activo con una alta porosidad que permita el flujo descendente del agua hacia capas inferiores o hacia sistemas de recolección. **La porosidad del suelo va a determinar la carga o caudal que permite tratar el suelo.** Para que estos suelos dispongan de una capacidad depurativa, deben cumplir ciertos requisitos y tener actividad. Es decir, no es suficiente con disponer de un lecho poroso, pero inerte, como podría ser un manto de arena. En este caso, el suelo, a pesar de ser poroso, debe tener un tamaño de poro reducido para poder retener material particulado e incluso coloidal (Basset et al., 2023). Además, las superficies de las partículas del suelo (como las arcillas o la materia orgánica) pueden interactuar con la carga contaminante mediante procesos de adsorción, intercambio catiónico u oxidación. Por otro lado, si el suelo dispone de un ecosistema edafológico, estos organismos también participarán en el tratamiento mediante procesos de asimilación y degradación biológica (Esfandiar et al., 2024).

Estos sistemas pueden ser aplicados para el tratamiento de aguas grises o aguas residuales domésticas con tratamiento primario o secundario. Es decir, no están pensados para altos caudales o una alta carga contaminante, como se verá en detalle más adelante. Sin embargo, puede ser una solución útil y práctica para pequeñas comunidades en las que se requiera o se busque la reutilización del agua, zonas descentralizadas o grandes campos de cultivo (Siegrist, 2017). El agua obtenida de estos tratamientos puede ser aplicada nuevamente como agua de riego, como recarga de acuífero o, incluso, puede destinarse a algunos usos industriales (si la calidad obtenida cumple con los límites legales).

Principalmente, se pueden diferenciar dos tipos de lechos: lechos de infiltración rápida y lechos de infiltración lenta. Aunque entre ellos las diferencias pueden parecer sutiles, cabe la necesidad de analizarlos por separado, ya que su diseño, operación, mantenimiento, rendimientos, etc. son diferentes.

Lechos de infiltración rápida

De los dos sistemas de lechos, este presenta una mayor simplicidad. Para su construcción únicamente se requiere de un vaso o zona deprimida donde se descargue el agua de tratamiento. Los principales parámetros críticos de diseño son los siguientes:

- **Permeabilidad del suelo:** el diseño está orientado hacia una alta permeabilidad del suelo para favorecer la velocidad de tratamiento, pero siempre asegurando que el agua no solo fluya, sino que también sea tratada. Se recomiendan valores de permeabilidad superiores a 15 mm/h (Bronstert et al., 2023).



- **Profundidad del suelo:** junto con la permeabilidad, es el otro principal factor. Una adecuada altura del lecho asegura que el tiempo de contacto del agua con el lecho es suficiente para completar el tratamiento. Este valor puede variar según la permeabilidad del lecho y la carga contaminante, pero los valores recomendados suelen superar siempre los 3,0-4,0 m (Siegrist, 2017).
- **Requisitos de superficie:** a pesar de que se trata de sistemas de actuación rápida, por cada metro cúbico de agua tratada al día, se suele requerir una superficie aproximada de 150 m². Este es uno de los motivos por los que esta solución no es válida para el tratamiento de altos caudales (Siegrist, 2017).

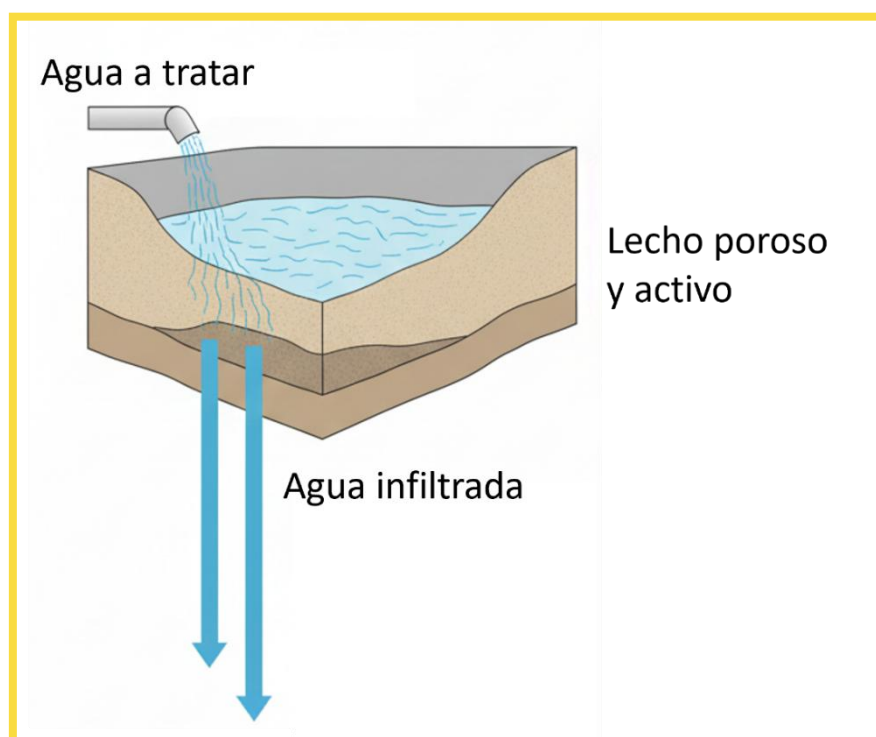
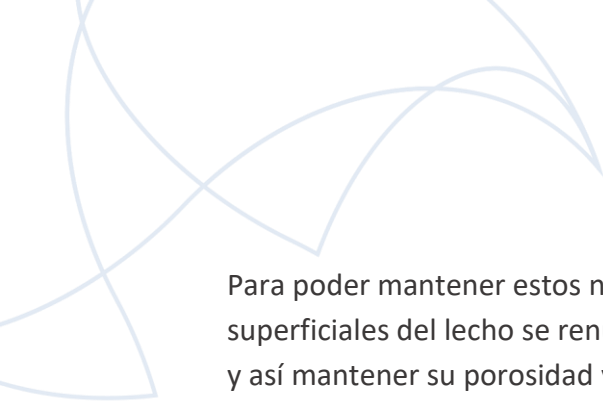


Figura 17. Estructura de un lecho de infiltración rápida.
Fuente: elaboración propia.

De forma general, se pueden alcanzar rendimientos de depuración del 80 % de materia orgánica, medida como demanda química de oxígeno (DQO), y casi la totalidad de los sólidos totales. Sin embargo, según la configuración y la actividad del lecho, la eliminación de nutrientes puede variar significativamente, desde la eliminación casi completa del nitrógeno y del fósforo (90 %-99 %) a porcentajes de tratamiento prácticamente nulos (0 %-25 %) (Duan & Fedler, 2009). Si lo que se pretende es eliminar nutrientes, es importante asegurar con una capa biológicamente activa en el lecho, así como con un material que interaccione química y físicamente con estos nutrientes.





Para poder mantener estos niveles de rendimiento se requiere que las capas más superficiales del lecho se renueven en función del caudal de trabajo y la carga orgánica y así mantener su porosidad y actividad (Siegrist, 2017). Además, es importante extraer los posibles depósitos que se generen sobre el lecho, por lo que cualquier pretratamiento, como un tamiz, decantación o similar, permitirá reducir los costes de mantenimiento. Por último, en base a su diseño, el lecho estará configurado para trabajar con un caudal máximo y mínimo, por lo que es recomendable laminar el flujo del agua para que el caudal de tratamiento se mantenga entre estos dos valores. El principal coste de operación de esta solución radica en los equipos de bombeo de descarga al lecho de infiltración.

En algunos casos, la implantación de este tipo de soluciones está más orientada a la recarga de acuíferos, consiguiendo mejorar la calidad del agua subterránea de forma secundaria. En Los Arenales (Castilla y León), observaron que el nivel piezométrico del acuífero se ha ido reduciendo desde 1970, hasta disminuir 30 metros en 30 años. Este descenso del acuífero conllevó la desaparición de humedales y otras masas de agua con interés ecológico, además de incrementar la presión sobre el sector agrario. Por ello, desde principios de los años 2000 se han estado realizando una serie de actuaciones para mejorar la recarga del acuífero (Hena Casas et al., 2022). Se ha desviado parte de los ríos de la zona hacia zanjas y canales de infiltración que permitan una recarga directa del acuífero, creando incluso zonas de inundación controlada. También se implementó un sistema para incrementar el volumen de agua infiltrado, recogiendo tanto las aguas de escorrentía urbana de los núcleos de la zona, como las aguas residuales tratadas. El desglose detallado del proceso de restauración se puede encontrar en MARSOL (2016).

Con este conjunto de actuaciones se ha podido revertir la tendencia y ahora el acuífero se está recargando y subiendo su nivel piezométrico en torno a 0,3 m al año. Al tratarse de actuaciones pasivas, en términos generales, conllevan una reducción del consumo energético ya que, al subir el nivel piezométrico, la energía necesaria para el bombeo del agua a los campos es menor, reduciendo de forma paralela las emisiones de CO₂ asociadas. Al subir el nivel freático se ha podido restaurar el lago de La Iglesia, un sistema acuático que depende estrechamente del nivel del acuífero. Por último, a nivel social se ha observado una mejora doble: la población rural ha mejorado su resiliencia frente a las sequías de los meses de verano y se ha reducido la presión hídrica asociada a las actividades agrícolas.



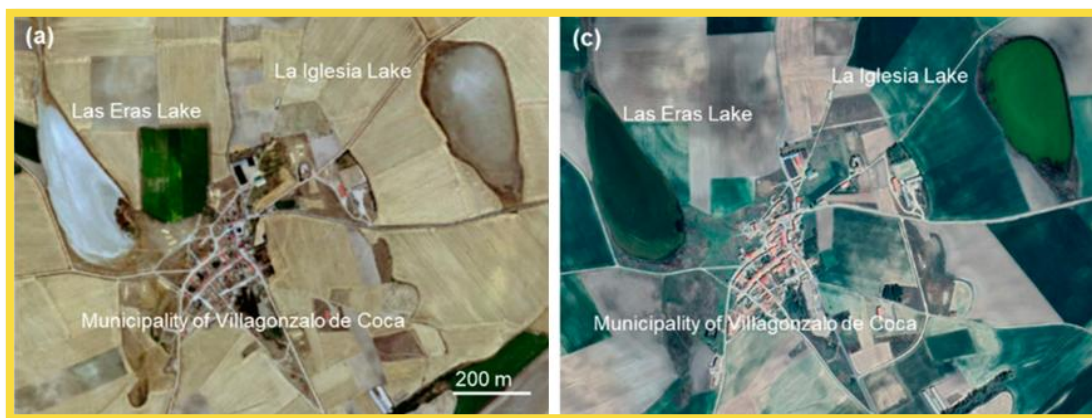


Figura 18. Fotografía del lago de la Iglesia y las Eras en 2004, antes de la restauración del acuífero (izquierda) y en agosto de 2017 (derecha).

Fuente: Henao Casas et al., 2022.

Lechos de infiltración lenta

Los sistemas de infiltración lenta también aprovechan el potencial de tratamiento del suelo, pero además basan ese tratamiento en la cubierta vegetal. En esta solución se cubre el lecho de tratamiento con plantas para potenciar la retención de nutrientes. Además, estas plantas pueden ser cosechadas posteriormente, en función del tipo de agua a tratar y de otros aspectos, como si son plantas leñosas o de otro tipo o si las hojas de la planta entran en contacto con el agua o no. Al tratarse de un sistema de infiltración lenta, los requisitos de diseño se ven modificados:

- **Permeabilidad del suelo:** en este caso, debido a la presencia de un gran sistema radicular de plantas y a que el objetivo es que la acción biológica sea superior a la actividad física y química del suelo, la permeabilidad deseada se sitúa entre 1,5 y 5,0 mm/h (Bronstert et al., 2023).
- **Profundidad del suelo:** dado que el agua fluye más lenta y se centra en la zona de actividad radicular, la profundidad del suelo debe de ser de 1,0 m, aunque este valor puede verse incrementando según el tipo de vegetación, entre otros factores (Siegrist, 2017).
- **Requisitos de superficie:** al tratarse de sistemas lentos y basados en la actividad biológica, los requisitos de superficie suelen ser superiores a los de sistemas de infiltración rápida, siendo necesarios valores de más de 200 m² por metro cúbico tratado y día (Siegrist, 2017).



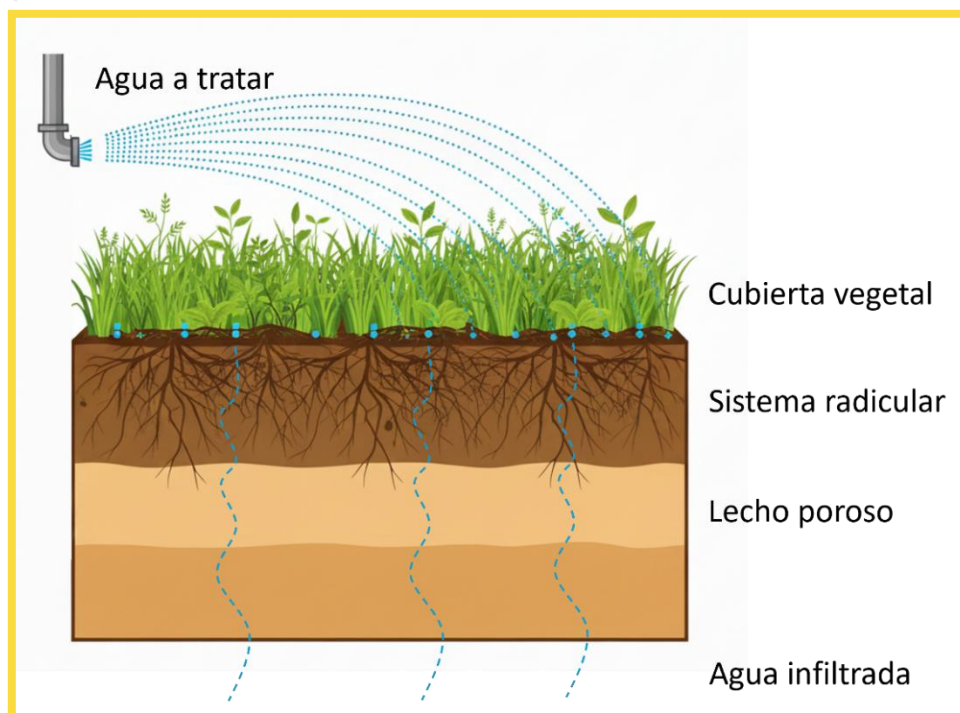


Figura 19. Estructura de un lecho de infiltración lenta.
Fuente: elaboración propia.

Este diseño se puede realizar en base a dos objetivos: por un lado, para maximizar el caudal de agua tratada, siendo la cubierta vegetal una herramienta más del sistema, o bien, para cultivar la cubierta vegetal, diseñando el sistema de tratamiento como un sistema de riego óptimo, siendo el tratamiento de las aguas un efecto positivo secundario de la actividad agrícola.

Dado que la actividad biológica juega un papel significativo, es importante considerar el clima de la zona para asegurar que el cultivo o la cubierta vegetal se desarrollen sin problemas. También pueden requerirse trabajos de laboreo entre cultivos para asegurar que se mantienen los rendimientos de tratamiento esperados. Además del bombeo del agua, en este caso, se tiene que asegurar que el agua a tratar ha sido tamizada o sedimentada previamente para evitar la colmatación del suelo. A los trabajos de mantenimiento del suelo se deben sumar las tareas agrícolas necesarias para asegurar que la cubierta vegetal se desarrolla sin problemas.

A diferencia de los sistemas de infiltración rápida, en estos lechos se suelen alcanzar valores de retención de nitrógeno y fósforo elevados (80 %-99 %) en función de la composición del agua y el tipo de cultivo (Duan & Fedler, 2009), por lo que son sistemas que garantizan una mayor calidad del efluente tratado, a la vez que permiten aprovechar el suelo para el desarrollo de la actividad agrícola.



En zonas naturales este proceso se puede potenciar mediante la intervención humana, como es el caso de Sierra Nevada (Granada). En entornos montañosos la disponibilidad del agua tiene una fuerte componente estacional asociada a las lluvias y el deshielo, pero, además, por las altas pendientes del terreno, una parte del agua se puede perder por escorrentía. Para potenciar la infiltración del agua y mejorar las reservas en los acuíferos y el subsuelo, en estos sistemas se construyen **acequias de careo**, canales de infiltración permeables que permiten reducir la velocidad del agua a la vez que fomentan una infiltración lenta hacia las capas inferiores. Este sistema está implementado en Sierra Nevada desde el siglo VIII y se ha demostrado que puede recoger e infiltrar hasta el 48% del agua de escorrentía. Además, mejora la calidad del acuífero porque al aportar un mayor volumen de agua reduce la salinidad en periodos de alta evapotranspiración (Jorge Jódar et al., 2022). Estos sistemas funcionan por gravedad, eliminando así cualquier requisito energético y al tratarse de una infraestructura comunitaria tradicional, su mantenimiento recae sobre la población local residente. Es decir, sistemas como estos demuestran la gran validez e importancia de estas soluciones, ya que ofrecen un alto beneficio con un bajo coste, a la vez que integran a la población local y aportan un elemento cultural y paisajístico identitario.

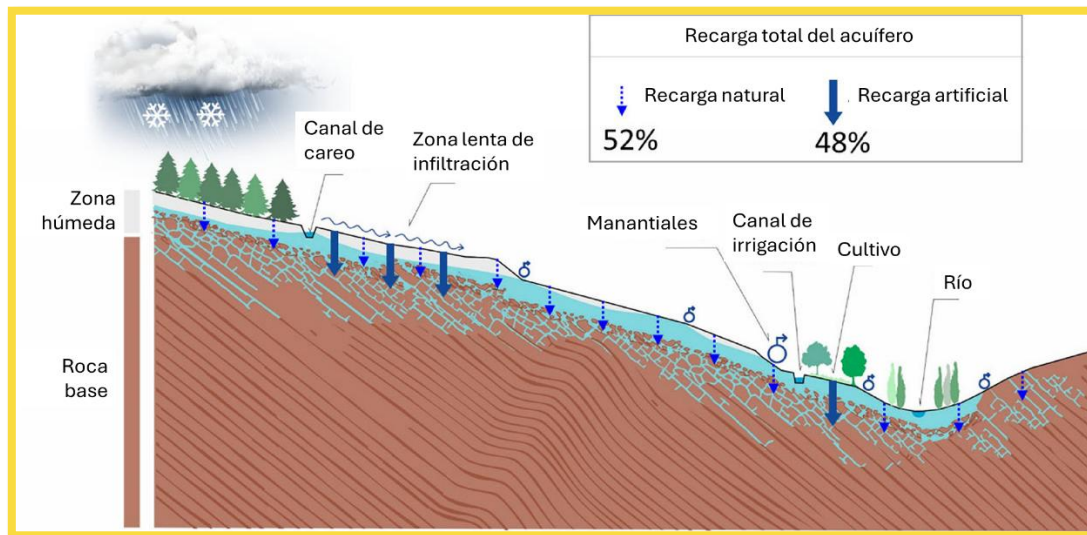


Figura 20. Flujo del agua en Sierra de Nevada.
Fuente: modificado de J. Jódar et al., 2022.

Sistemas urbanos de drenaje sostenibles

Uno de los principales problemas de los entornos urbanos es su **alto grado de impermeabilización** porque la mayor parte del suelo está aislado por el asfalto o las aceras. Esta impermeabilización conlleva dos grandes problemas. Por un lado, al



minimizar la infiltración del agua, se reduce la tasa de recarga de los acuíferos que pueden estar ubicados bajo los núcleos urbanos. Por otro, una superficie tan amplia e impermeable provoca que en periodos de lluvias intensas el agua se acumule, derivando en problemas de inundaciones cuando el sistema de alcantarillado se ve superado. Según TRAGSA (2015), hasta el 95 % del agua se convierte en escorrentía en una ciudad, mientras que en un entorno natural este valor puede reducirse al 5 %. Siguiendo la filosofía de los sistemas de infiltración, los entornos urbanos cada vez más están integrando diferentes sistemas urbanos de drenaje sostenibles (SUDS).

Los SUDS tienen varias finalidades, según su diseño y los objetivos que se planteen. Por un lado, están aquellos que retienen el agua de las lluvias e impiden que continúe su flujo. Soluciones de este tipo son las cubiertas vegetales (que se verán más adelante), jardines urbanos u otros espacios verdes e, incluso, pavimentos filtrantes. En el caso de pavimentos permeables podemos encontrar diferentes modalidades, desde aquellos que se diseñan con material impermeable, pero con juntas separadas y permeables, hasta los que están conformados por material permeable en su totalidad (material disgregado y/o vegetal).



Figura 21. Fotografía de la estación de autobuses de Logroño.
Fuente: Arch Daily (2021).



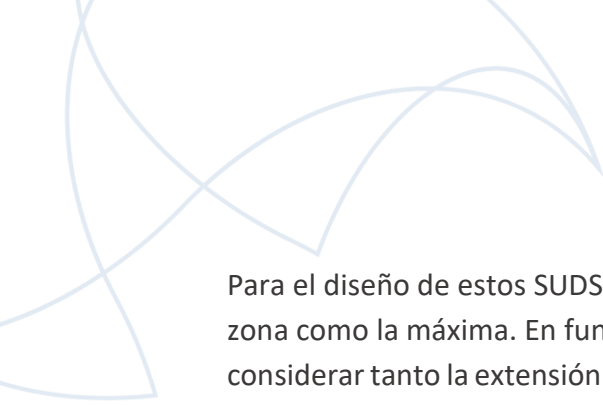
En caso de que no se pueda detener completamente el agua, también se pueden plantear soluciones que ralentizan el movimiento del agua. Soluciones de este tipo englobarían opciones como las **zanjas de infiltración**. Por otro lado, también es común retener o almacenar el agua temporalmente. Tradicionalmente se han implantado **tanques de tormentas**. Estas infraestructuras son depósitos enterrados en las grandes ciudades que permiten albergar importantes cantidades de agua en episodios de lluvia intensa para, posteriormente, evacuarla a un caudal controlado. Actualmente se están diseñando espacios urbanos con capacidad de almacenamiento, que no solo ayudan a laminar el agua, sino que también aportan un beneficio ambiental y social, como son los **parques inundables**. Estos entornos tienen un uso recreativo y con valor paisajístico durante los periodos secos y cuando se concentran las precipitaciones su diseño les permite recibir grandes volúmenes de agua y evitar la inundación de su entorno. Posteriormente, esta agua se puede evacuar de forma controlada. Un ejemplo es el parque La Marjal de Alicante. Este parque tiene una extensión de 3,6 hectáreas y puede acumular hasta 45.000 m³ de aguas pluviales (Veolia, 2026). Este sistema ya demostró su eficacia en 2019 cuando llegó a recibir hasta 22.000 m³ (El Independiente, 2019). El agua almacenada es desaguada de forma controlada a una estación depuradora previamente a su vertido final.



Figura 22. Fotografía del parque La Marjal en un periodo sin lluvias (arriba) y tras un periodo de lluvias intensas (abajo).

Fuente: AQUAE Fundación, 2025 (arriba) y Veolia, 2026 (abajo).





Para el diseño de estos SUDS es necesario considerar tanto la precipitación media de la zona como la máxima. En función del volumen de agua que se espera recibir, se deberá considerar tanto la extensión del SUDS como su permeabilidad. En el caso de los parques u otros sistemas de detención de agua se recomienda (MITECO, 2019):

- **Diseño:** que la proporción largo-ancho esté entre 2 a 1 y 5 a 1. La pendiente mínima en la base debe ser del 1%-2 % en dirección al desagüe.
- **Desagüe:** deben existir varios desagües e incluso un sistema de vaciado de emergencia.
- **Morfología:** en zonas donde la lluvia es frecuente, se recomienda apostar por sistemas que mantengan siempre el agua, a modo de estanque o humedal, donde se pueda incrementar la profundidad de la balsa. En el lado opuesto, en zonas donde las lluvias sean poco frecuentes, pero intensas, se recomiendan diseños más extensos, pero de menor profundidad.

Para que estos sistemas puedan ser útiles en los momentos requeridos es necesario realizar una limpieza periódica para eliminar la basura y otros sólidos. En el caso de que exista vegetación, será necesario realizar un mantenimiento para limitar su crecimiento. Además, es importante hacer una revisión anual, o tras un periodo de tormenta intensa, de los sistemas de conducción y desagües de las zonas inundables, para asegurar que no han sido dañadas. Si se trata de un sistema con agua permanente, se tiene que confirmar la calidad del agua periódicamente, por motivos higiénicos y ambientales (MITECO, 2019).

Fito y fitorremediación

Otra de las bases de las SBN son los **procesos de fitorremediación** (es decir, tratamientos basados en las capacidades de las plantas) y la **fitorremediación** (tratamientos basados en microalgas). En términos generales, estos seres vivos van a ser capaces de degradar compuestos contaminantes del medio, transformándolos en otros compuestos finales o intermedios menos perjudiciales o más fáciles de eliminar por otras vías. También pueden asimilarlos e integrarlos como parte de su tejido o estructura celular e, incluso, adherirlos en su superficie extrayéndolos de la fase acuosa.

Ya se ha indicado en el caso de los lechos filtrantes que al incorporar una cubierta vegetal se incrementan los porcentajes de eliminación de nutrientes como el fósforo y el nitrógeno. Más adelante se verá cómo estas soluciones se integran en sistemas más complejos. En este apartado se explican los principales mecanismos de actuación de



las plantas y las algas, y en el apartado relativo a las SBN más complejas, se detalla cómo se integran con la totalidad de actores.

Aunque en ambos casos se trata de seres vivos que basan su crecimiento en la fotosíntesis, es necesario separar el tratamiento con plantas del tratamiento con algas, ya que presentan mecanismos de acción distintos. Además, ambas soluciones tienen requisitos de diseño, aplicabilidad, rendimientos y otros aspectos operativos diferentes.

Fitorremediación

Las plantas pueden ser empleadas para descontaminar ambientes acuáticos gracias a su interacción con el medio. A través de las raíces, las plantas absorben el agua y así, también los compuestos que estén disueltos en ella. En algunos casos, los contaminantes pueden ser empleados por la planta como nutrientes, como en el caso del fósforo, magnesio, amonio, etc. Sin embargo, hay que tener en cuenta que, al tratarse de un proceso biológico, la planta tendrá una tasa de asimilación concreta para cada nutriente y la velocidad podrá variar por parámetros climáticos, otros aspectos de la calidad del agua, velocidad del flujo, etc. (Kafle et al., 2022).

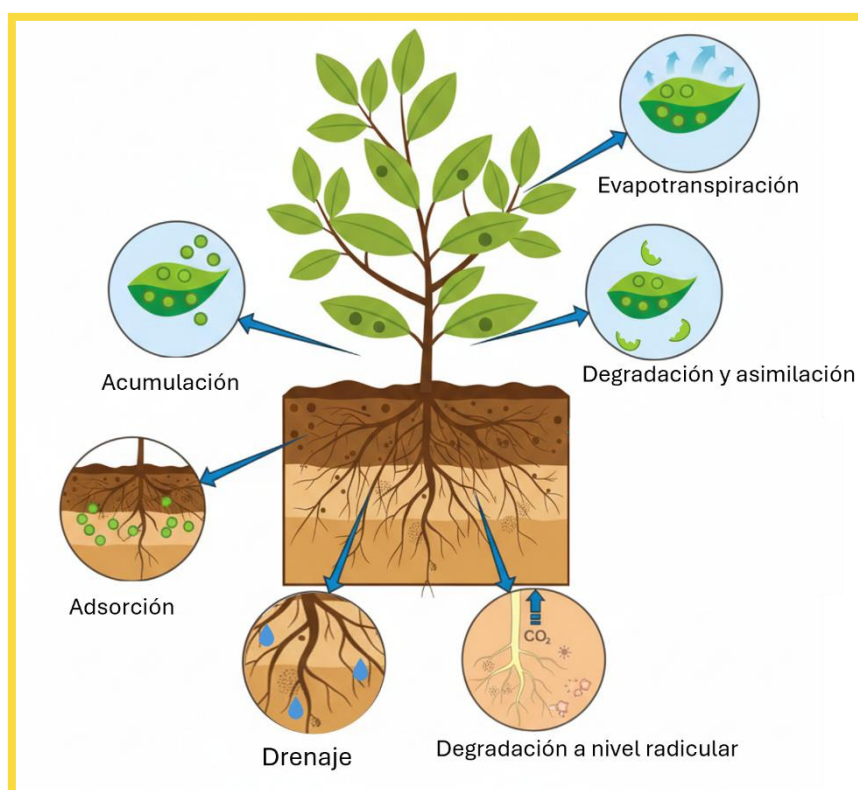
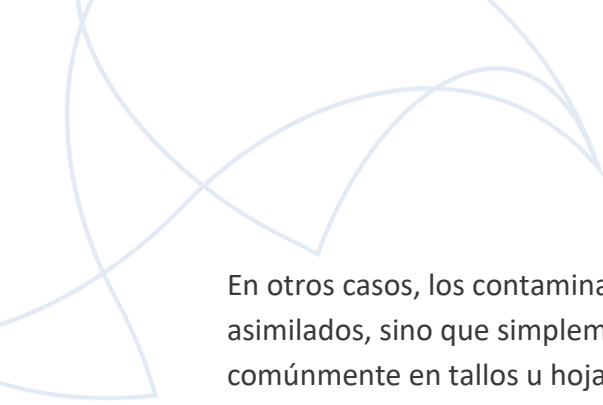


Figura 23. Principales mecanismos de fitorremediación.
Fuente: Elaboración propia





En otros casos, los contaminantes absorbidos no llegan a ser transformados y asimilados, sino que simplemente son acumulados en el interior de la planta, comúnmente en tallos u hojas, aunque depende de la especie de planta. Este proceso suele emplearse para reducir la presencia de metales pesados (hierro, cadmio o arsénico) ya que se ha observado que pueden retener grandes cantidades. En este sentido, las **plantas hiperacumuladoras** son aquellas que pueden retener en su sistema una proporción mínima de metal pesado respecto a su materia seca (Kafle et al., 2022). Así, teniendo en cuenta, por ejemplo, el cadmio, si deshidratamos una planta hiperacumuladora, tendrá al menos 100 mg de metal pesado por kilogramo de parte aérea. Además, esta planta debe ser capaz de tolerar estas concentraciones y no limitar su crecimiento. Un ejemplo de este tipo de proceso es el del helecho *Pteris vittata* que puede acumular más de 5.000 mg de cadmio por kg (Cui et al., 2023).

En otros casos, estos contaminantes son simplemente adsorbidos en las raíces de las plantas por afinidad y se mantienen en esta fase. Sin embargo, para que se complete el tratamiento del contaminante se deben dar una serie de transformaciones a través de enzimas liberadas por las raíces o del consorcio que forman las raíces con hongos y bacterias (Kafle et al., 2022). Este sistema ha sido empleado para la eliminación de compuestos volátiles, como pueden ser los hidrocarburos, mediante plantas herbáceas como la *Festuca arundinacea* (Zhang et al., 2025).

Por último, las plantas pueden jugar un papel importante a la hora de controlar el flujo del agua. La presencia de un sistema vegetal desarrollado y maduro asegura que el suelo presente una buena porosidad y, por lo tanto, en episodios de lluvias intensas, estas cubiertas vegetales favorecen la infiltración del agua hacia el subsuelo y capas inferiores, reduciendo la escorrentía (Kafle et al., 2022). Este mecanismo se emplea en sistemas de drenaje urbanos sostenibles y en restauraciones fluviales. Por el contrario, en momentos de alta radiación solar, cuando el ambiente es más seco y hay una falta de disponibilidad de agua en la superficie, las raíces ejercen un bombeo ascensional del agua mediante la evapotranspiración (Kafle et al., 2022). Las plantas no solo aportan sombra (en el caso de los árboles), sino que gracias a su sistema vascular son capaces de extraer agua de las capas bajas del suelo y liberarla a la atmósfera, ayudando a mejorar la sensación térmica y a refrescar ambientes cálidos. Por este motivo, cada vez es más necesaria la presencia de cubiertas vegetales en las tramas urbanas y la gran mayoría de las SBN aplicadas en entornos urbanos cuentan con este mecanismo como una de sus herramientas principales.



Tratamiento con algas

De forma tradicional, la fitorremediación ha presentado algunas limitaciones a la hora de trabajar con masas acuáticas, porque las plantas empleadas principalmente son emergentes. Es decir, requieren un sustrato de soporte y es sobre ese sustrato donde las plantas actúan. Por este motivo, las plantas terrestres solo actúan en los contornos de las masas acuáticas, no pudiendo realizar una descontaminación activa en la columna de agua. Este nicho de trabajo ha sido ocupado por el empleo de microalgas, que se distribuyen a lo largo de la columna de agua hasta llegar a la **zona fótica**. En términos muy generales, las algas tienen un comportamiento análogo o similar al de las plantas terrestres a la hora de enfrentarse a un contaminante, ya que actúa de una manera parecida: lo degrada, lo asimila, lo acumula o lo adsorbe en su membrana o superficie. Además, también pueden trabajar de forma sinérgica con diferentes microbiotas bacterianas, ampliando su potencial de purificación. Sin embargo, cabe señalar que los procesos metabólicos que tienen lugar sí que presentan diferencias.

El tratamiento con algas puede ser **pasivo o activo**. El tratamiento pasivo se encuentra en SBN como los humedales construidos o los lagunajes convencionales, como se verá más adelante. En estos casos, el desarrollo de las algas sigue un comportamiento natural, prácticamente sin intervención o influencia humana, respetando sus ciclos de crecimiento. La única intervención se realiza para la retirada de las algas si su crecimiento excede al deseado, pudiendo llegar incluso a generar efectos adversos como los derivados de la eutrofización.

Pero, este potencial de tratamiento y valorización de recursos de las algas se puede emplear de una forma activa. Existen diferentes configuraciones de reactores biológicos donde las algas son expuestas a altas concentraciones de nutrientes, con ciclos de luz naturales o artificiales, y donde se potencia o se busca maximizar su crecimiento. Entre las configuraciones más comunes se encuentran los reactores tipo carrusel o *raceway*, los tubulares y los planos. Todos ellos tienen un mismo parámetro común y es que la columna de agua es estrecha para garantizar que la luz penetra en todos los puntos, dada la alta densidad de algas que albergan estos reactores. Aunque se basen en los sistemas de purificación de las algas, estos reactores están en una posición similar a la de los biológicos de las depuradoras convencionales: sus rutas metabólicas se corresponden con rutas naturales. Pero, mediante la intervención humana, estas rutas han sido redirigidas a compuestos de interés y la cinética de su metabolismo se ha visto acelerada.





Figura 24. Sistema de lagunaje con algas (izquierda) y reactor tubular cerrado de producción de algas (derecha).
Fuente: Nano Gas Environmental, 2024 (izquierda) y Lgem, 2025 (derecha).

Las SBN con tratamiento de algas se centran en tratamientos pasivos, al ser más coherentes con los principios en los que se basan las SBN.

Muros y techos verdes

Una forma de aplicar a pequeña escala los tratamientos con plantas, junto con un sistema de infiltración, son los **techos y muros vegetales**. Esta SBN es aplicada en entornos urbanos e industriales para el tratamiento de aguas grises, aunque aporta una serie de ventajas adicionales que van más allá de la regeneración del agua para riego o en los lavabos. Gracias al efecto de sombra que ejerce la cubierta vegetal, estas construcciones permiten reducir la energía solar que llega al edificio, reduciendo la temperatura en el interior. Además, la evapotranspiración permite **reducir la intensidad del efecto de isla de calor** que se produce por la concentración de edificios en las ciudades. En términos ecológicos, estas islas verdes pueden acoger diferentes tipos de insectos, como polinizadores, ayudando a mantener o mejorar la biodiversidad de entornos urbanos (Pradhan et al., 2019).

Para poder asegurar el crecimiento vegetal, conseguir un adecuado rendimiento y no perjudicar al edificio, es necesario combinar una serie de capas con diferentes propiedades. Al menos se requiere una capa de suelo para albergar la cubierta vegetal, membranas para sostener y controlar las raíces, capas filtrantes para evacuar el agua y evitar acumulaciones y una capa final aislante (Thomaidi et al., 2022).



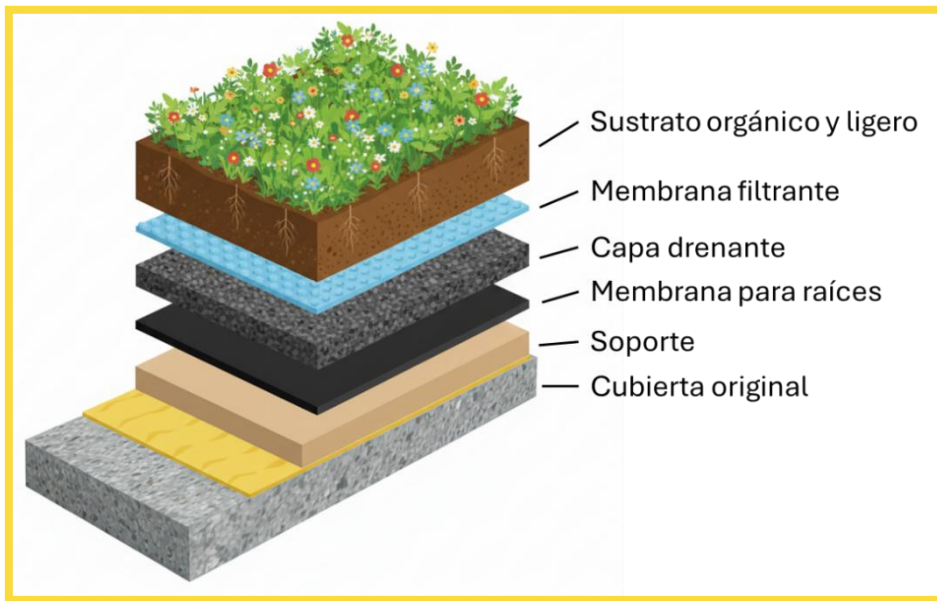


Figura 25. Estructura de un techo verde.
Fuente: elaboración propia.

Respecto a los muros vegetales, cuando están a nivel de suelo, suelen incluir especies trepadoras que enraízan en el suelo y por su propio crecimiento se van adhiriendo a la fachada o a un marco o estructura complementaria habilitada para este fin. Por otro lado, el recubrimiento vegetal completo de una fachada debe hacerse empleando sustratos especiales que limitan el peso aportado a la fachada y es necesario desarrollar una estructura para albergar las plantas (Pradhan et al., 2019).

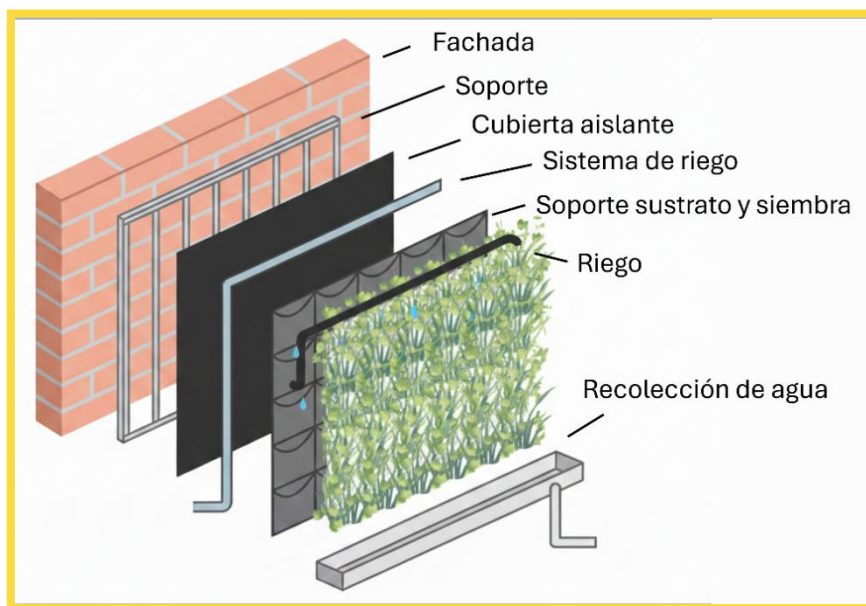


Figura 26. Estructura de una cubierta vegetal.
Fuente: elaboración propia.



Entre los parámetros de diseño que tener en cuenta cabe destacar:

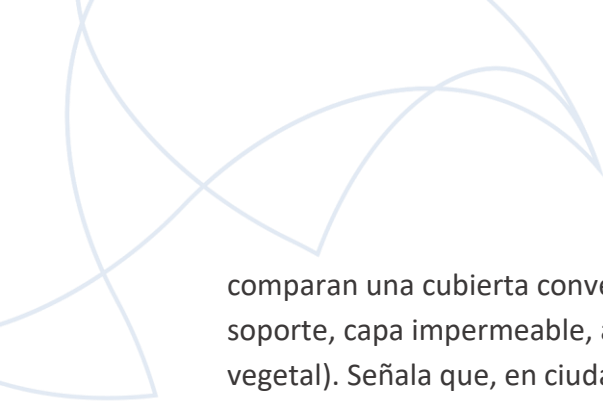
- **Características del tejado:** puede ser de una amplia variedad de materiales, pero hay que evitar algunos como la madera sin tratar o el metal sin cubrimiento. Para eludir la acumulación excesiva de agua se requiere asegurar una pendiente del 7 % (Thomaidi et al., 2022).
- **Orientación:** no hay limitaciones en cuanto a la orientación de la fachada, pero se debe considerar el tiempo diario de exposición al sol a la hora de seleccionar las especies vegetales.
- **Sustratos:** para evitar sobrecarga en la estructura, hay que utilizar material ligero como arcilla expansiva, perlita, cáscara de coco... y limitar la presencia de la materia orgánica al 20 % o menos. El espesor de la capa en techos dependerá del tipo de vegetación, siendo comunes espesores entre 5 y 50 cm. En el caso de los techos verdes, el espesor se reduce debido al tipo de plantas que suelen incluirse (Prodanovic et al., 2017).
- **Carga estructural:** hay que tener en cuenta que los techos vegetales pueden llegar a aportar un peso extra de entre 20 a 200 kg/m², cuando se trata de plantas herbáceas y de baja altura. Pero, pueden llegar a aportar un peso extra de 700 kg/m² cuando se trata de jardines en el techo (Thomaidi et al., 2022).

El rendimiento de depuración de estas soluciones es variado, tanto por la elección de las plantas como por el objetivo final de la instalación (regenerar agua u obtener el resto de los beneficios ambientales a un menor coste). Por ello, la eliminación de nutrientes, materia orgánica e incluso sólidos suspendidos presenta una amplia variación en la bibliografía, reportando rendimientos desde el 10 % al 99 % en la eliminación de contaminantes del agua (Prodanovic et al., 2017).

Un aspecto importante en el mantenimiento de estas estructuras es **el control y la eliminación del exceso de raíces**, ya que pueden provocar obstrucciones en los sistemas de riego y en las zonas de evacuación del agua. En el caso de los techos vegetales, se requiere hacer un seguimiento de las plantas y el suelo para saber si es necesario aportar otros nutrientes de forma complementaria y eliminar el material suspendido que pueda acumularse debido a las lluvias y al agua gris. En el caso de las fachadas vegetales, el seguimiento se tiene que incrementar en los primeros meses para asegurar que todas las plantas se adaptan correctamente y que la dirección de su crecimiento es la deseada.

Estos sistemas han sido ampliamente estudiados para poder cuantificar las mejoras ambientales y sociales que pueden ofrecer. En el trabajo de Borràs et al. (2022)





comparan una cubierta convencional con una cubierta vegetal (con estructura de soporte, capa impermeable, aislante térmico, capa de drenaje, sustrato y cubierta vegetal). Señala que, en ciudades más frías y secas como Burgos, Madrid o Bilbao, estos sistemas ayudan a reducir el consumo energético hasta en un 34 %, permitiendo mantener la temperatura del interior. Sin embargo, en zonas de influencia del clima mediterráneo (más cálidas y húmedas) como Barcelona, Sevilla o Almería, la reducción de energía oscila entre el 23 % y el 9 %. Esto se debe a que el efecto de la evapotranspiración es más notable en ambientes más secos y demuestra que, aunque existan organizaciones como *The Green Roof Organisation* que pone a disposición del público guías y materiales para optimizar el diseño de estas cubiertas vegetales (*Green Roof Organisation, 2026*), es necesario adaptar las cubiertas a los requisitos climáticos y botánicos de la zona, con documentos como el manual de “Cubiertas verdes adecuadas para el área Mediterránea” (Romero, 2022).

Lagunaje

Los lagunajes son unas soluciones que combinan principalmente la actuación de las bacterias con procesos físicos de sedimentación y desinfección. En algunos casos puede sumarse la acción depurativa de algas o plantas como cultivos acuáticos. Sin embargo, debido a que el fondo de la laguna se encuentra impermeabilizado, en este caso no se contempla la infiltración. En los lagunajes la intervención humana es ligeramente mayor que en otros casos, llegando a compartimentar el tratamiento en diferentes lagunas con diseños específicos para fomentar o potenciar un mecanismo de tratamiento frente al resto. Incluso, en función del objetivo, se pueden llegar a incluir ayudas similares a las que se verían en infraestructuras grises, como sistemas para airear las lagunas y mejorar el tratamiento o etapas de separación de la biomasa generada. Como se explica a continuación, las lagunas pueden ser diseñadas de diferentes maneras y para un tratamiento concreto se puede aplicar un único lagunaje o una combinación de ellos hasta alcanzar el objetivo de calidad.



Figura 27. Sistema de lagunajes en Ottawa, Ontario.
Fuente: Bishopwater.

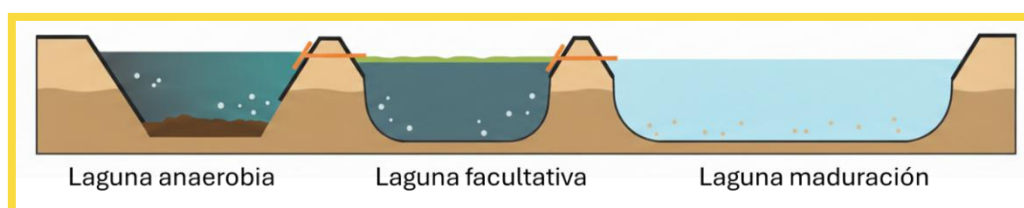


Figura 28. Ejemplo de combinación de sistemas de lagunajes.
Fuente: elaboración propia.

Las bacterias, como el resto de los seres vivos, necesitan una fuente de carbono y nutrientes para su crecimiento celular. Por un lado, las **bacterias heterótrofas** son capaces de tomar del medio la materia orgánica y nutrientes como el nitrógeno y el fósforo para su mantenimiento y duplicación. Sin embargo, por su tamaño microscópico, estos organismos necesitan de un proceso previo de hidrólisis por el que fragmentan la materia orgánica compleja en moléculas simples fácilmente asimilables por ellos. Además de las bacterias heterótrofas, las que buscan la fuente de carbono en la materia orgánica, es importante el papel de las **bacterias autótrofas**, las que toman el carbono del CO_2 o carbonatos. Este segundo grupo de bacterias son clave en la eliminación de nutrientes, ya que la tasa de eliminación por esta vía es muy superior a la heterótrofa. Las autótrofas emplean el nitrógeno y fósforo como fuente energética mediante su transformación y oxidación. En resumen, el conjunto de las bacterias heterótrofas y autótrofas permiten transformar la materia orgánica y los nutrientes en compuestos no contaminantes para el agua, como el CO_2 y el N_2 , o los mineralizan en su interior celular.



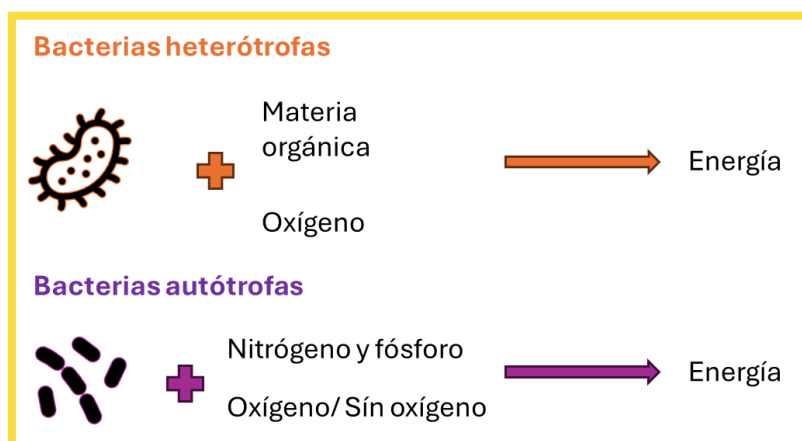


Figura 29. Mecanismos depurativos que llevan a cabo las bacterias.
Fuente: elaboración propia.

Aunque, como se verá a continuación, el sistema de lagunajes emula un proceso biológico convencional de depuración con infraestructura gris, esta SBN presenta una serie de ventajas ambientales y sociales que una depuradora convencional no puede aportar. En los lagunajes se puede disponer de vegetación autóctona en los márgenes que ayuda no solo a mantener la diversidad de flora de la zona, sino que mejora la biodiversidad de polinizadores y otros insectos. También tiene un valor ecológico al poder ser aprovechado por aves u otros animales como fuente de agua, sobre todo en las etapas finales del lagunaje, cuando la calidad del agua ha sido restituida. Por último, a nivel paisajístico, este tipo de intervenciones son menos invasivas que una infraestructura gris.

Los sistemas de lagunaje suelen ser aplicados en zonas o territorios donde la superficie disponible no es un parámetro limitante, donde el agua que tratar no presenta una alta complejidad en cuanto a contaminantes específicos como metales o una alta carga contaminante y, en especial, cuando se desea reducir los costes de mantenimiento y operación. Porque, aunque cada lagunaje requiere de un mantenimiento específico, el control y seguimiento que se debe hacer es inferior al de una depuradora convencional.

Laguna anaerobia

La primera laguna que suele aparecer en un esquema de tratamiento de lagunaje es la **laguna anaerobia**. El objetivo principal de esta etapa es retener la mayor parte de sólidos suspendidos en el agua y, con ello, la materia orgánica. Estos sistemas actúan como balsas de decantación y de degradación de la materia orgánica sedimentada por la vía anaerobia (es decir, en ausencia de oxígeno). Estas lagunas se caracterizan por ser las que presentan una mayor profundidad y un menor tiempo de residencia



hidráulico (TRH) (Von Sperling, 2007), ya que la actividad de las bacterias se focaliza en la materia decantada y no sobre la materia orgánica soluble. Su diseño viene determinado por la caracterización del agua de entrada, principalmente en función del contenido de sólidos suspendidos y materia orgánica medida en DBO, por lo que, pretratamientos como tamices o rejas finas, pueden ayudar a reducir los requisitos necesarios de superficie (Wang & Wang, 2025).

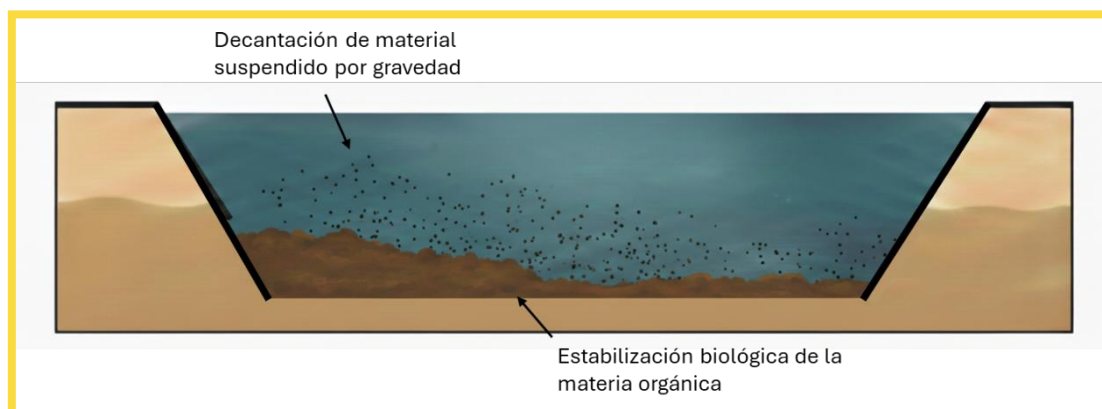


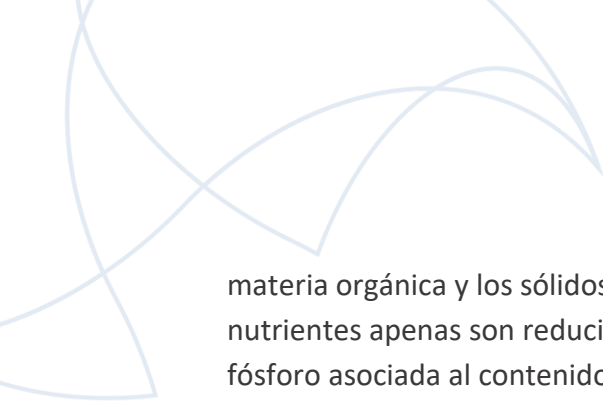
Figura 30. Esquema de un lagunaje anaerobio.
Fuente: elaboración propia.

- **Profundidad:** se requiere que al menos tenga 3 m de profundidad para poder separar correctamente el fango suspendido de la corriente de agua que tratar (Von Sperling, 2007).
- **TRH:** entre 1 y 2 días para asegurar que el material suspendido se ha decantado. Mayores velocidades de caudal pueden provocar la resuspensión del manto de sólidos del fondo (Von Sperling, 2007). Este valor puede reducirse empleando cámaras de mezcla del agua de entrada o elementos que ayuden a la decantación como deflectores.
- **Ancho:** son preferibles configuraciones alargadas para fomentar el depósito de los materiales (Von Sperling, 2007).

En estas lagunas es importante mantener un plan de mantenimiento adecuado para la retirada de sólidos y fango generados por las bacterias, ya que en el fondo habrá una acumulación continua de biosólidos. Por otro lado, en estas etapas suele haber problemas de olores cuando el agua de entrada presenta una alta carga orgánica biodegradable, contiene un alto contenido de sulfatos o se mantiene una alta acumulación de sólidos en el fondo (Wang & Wang, 2025).

Dado que en esta laguna principalmente se busca la sedimentación y la estabilización de la materia orgánica retenida, los rendimientos de eliminación son altos para la





materia orgánica y los sólidos suspendidos (entre 60 %-75 %), mientras que los nutrientes apenas son reducidos en un 10 %-20 %, es decir, la fracción de nitrógeno y fósforo asociada al contenido decantado (Calabrò et al., 2024).

Laguna facultativa

En un esquema de lagunaje convencional, el agua de salida de la etapa anaerobia sería tratada posteriormente en una **laguna facultativa**. En esta etapa, el agua es retenida durante mayor tiempo, ya que el objetivo en este caso es asegurar el tratamiento biológico mediante la combinación de algas y bacterias. La profundidad de esta laguna es algo menor, pero, aun así, tiene es suficiente como para asegurar que existe una zona aerobia (con presencia de oxígeno) en las capas altas y una zona anóxica (ausencia de oxígeno) en las capas inferiores (Von Sperling, 2007). Esta diferenciación de capas es clave para asegurar que las bacterias autótrofas puedan eliminar de forma satisfactoria los nutrientes presentes.

De forma simplificada, las algas presentes en la capa superficial asimilan nutrientes a la vez que aportan oxígeno a esta capa. Además, aprovechan el CO₂ generado por las bacterias como fuente de carbono. Por su parte, las bacterias heterótrofas de las capas altas emplean este oxígeno para transformar y degradar la materia orgánica, mientras que las autótrofas completan la eliminación del nitrógeno y fósforo mediante procesos biológicos secuenciales que van ocurriendo entre ambas capas, la aerobia y la anaerobia. De esta manera, gracias a la acción combinada de todos estos organismos se logra descontaminar el agua de los compuestos solubles (aquellos que no han decantado en la laguna anaerobia).

La profundidad de la laguna juega un papel importante. Si se dispone de una laguna poco profunda, la luz llegará a todos los estratos del agua, permitiendo el desarrollo de algas en toda la columna de agua. Con ello, el oxígeno estará presente en todo momento, inhibiendo y bloqueando ciertos procesos de las bacterias autótrofas que son esenciales para el tratamiento completo del agua. Si la laguna presenta una profundidad elevada, se asegura esta diferenciación de capas, pero encarece su construcción y mantenimiento posterior. Además, al incrementar la columna anóxica en exceso, se pueden ralentizar los procesos de depuración al disminuir la tasa de transferencia de compuestos entre las capas (Von Sperling, 2007).





Figura 31. Esquema de un lagunaje facultativo.
Fuente: elaboración propia.

- **Profundidad:** se requiere una profundidad de 1 a 2 m (Von Sperling, 2007).
- **TRH:** superiores a 4 días, en función de la carga contaminante y del objetivo de depuración establecido. También influye la temperatura. En climas más fríos se ralentiza la actividad biológica, siendo necesarios mayores tiempos de contacto (Von Sperling, 2007).
- **Requisitos de oxígeno:** el aporte del oxígeno suele venir por procesos naturales, como la fotosíntesis de las algas, o por aireación natural a través del viento. Sin embargo, si la cantidad de materia orgánica es elevada, el oxígeno puede incrementarse mediante aireadores mecánicos superficiales o fijos en el fondo. Estos pueden actuar de forma intermitente o distribuirse solo por una parte de la laguna, asegurando que existan zonas anóxicas (Wang & Wang, 2025).

En estas lagunas también pueden aparecer problemas de olores si hay un exceso de materia orgánica o derivados de la etapa anterior. Es importante hacer retirada frecuente del posible biosólido depositado en el fondo. A diferencia de la anterior laguna, el sólido decantado en esta etapa estará formado en su mayor parte por bacterias muertas (Wang & Wang, 2025). Si el crecimiento de algas es superior al deseado, tiene que considerarse también su cosechado y extracción del medio con cierta periodicidad. En caso de existir aireadores mecánicos, hay que tener en cuenta su consumo energético (que será la principal demanda energética del sistema de depuración), así como su revisión y mantenimiento.

En algunos sistemas, debido a su alta tasa de carga orgánica, se pueden instalar lagunas aireadas como primera etapa de tratamiento para enfocarlo en la reducción de materia orgánica. Una vez reducida la materia orgánica significativamente, se incluye una laguna facultativa para reducir la presencia de nutrientes sin la



interferencia de un crecimiento excesivo de bacterias heterótrofas. De esta manera, se puede optimizar el diseño y funcionamiento de cada una de las etapas (Wang & Wang, 2025).

En estas lagunas es común obtener una reducción de materia orgánica superior al 40 %, llegando a valores del 80 % para aguas muy biodegradables y con sistemas con ayudas mecánicas de aireación. Los nutrientes son eliminados en un amplio intervalo, según su configuración y el crecimiento de las algas, pero pueden llegar a alcanzar rendimientos del 90 % para el nitrógeno y del 50 % para el fósforo. Los sólidos en esta etapa son retenidos en menor medida, ya que los que más fácilmente sedimentan son extraídos en la laguna anaerobia (Calabrò et al., 2024).

Estas tasas de eliminación se pueden obtener para aguas residuales urbanas e industriales, como refleja la revisión de Fonade et al. (2000). En este trabajo se evaluó el rendimiento de varios lagunajes facultativos aireados instalados en diferentes industrias francesas como una planta de celulosa, una refinería de azúcar o una planta de elaboración de papel corrugado. En estos casos, se logró una reducción de la DBO de hasta el 85% para altos caudales industriales (hasta 1.200 m³/h) con elevadas cargas diarias de materia orgánica (cerca de 100 toneladas de DQO al día).



Figura 32. Laguna facultativa aireada de la planta de celulosa en Tartas (Francia), donde se puede apreciar la espuma y las burbujas en su superficie. En la derecha de la imagen se aprecia el tamaño de la instalación industrial. Fuente: Google Maps.

Una variante de las lagunas facultativas son las **lagunas de alto crecimiento algal**. En estas lagunas se fomenta el crecimiento de las algas como principales agentes de tratamiento de los contaminantes diseñando para ello lagunas de tipo carrusel. Este



sistema permite reducir la generación de fangos biológicos al minimizar la actividad bacteriana, ya que son las algas las encargadas de eliminar los contaminantes. Debido a esto, este sistema funciona mejor para tratar corrientes con una baja carga orgánica. En aquellos casos donde el agua presenta un alto contenido de materia orgánica, pueden incorporarse previamente lagunas facultativas aireadas, para que el tratamiento se enfoque en la materia orgánica. De manera adicional, las algas obtenidas en este proceso pueden ser empleadas como subproducto, como enmiendas y fertilizantes o, incluso, como parte de la alimentación animal en ganadería, en función de las calidades microbiológicas de las algas cosechadas. En este caso, deben modificarse algunos parámetros de diseño respecto a las lagunas facultativas (Young et al., 2017).

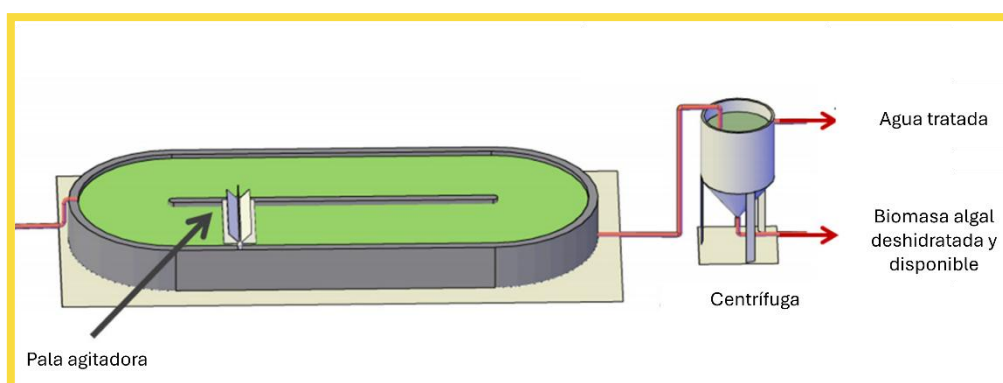


Figura 33. Esquema de un lagunaje facultativo con alta tasa.
Fuente: modificado de Vassalle et al., (2020).

- **Profundidad:** al no requerir de actividad biológica anóxica, es suficiente con profundidades de 0,5 m. Además, una mayor profundidad genera capas sin actividad, ya que es posible que la radiación solar no llegue o sea mínima.
- **TRH:** siguen siendo tiempos de residencia altos, pero pueden llegar a ser menores que en el caso de las lagunas facultativas, ya que normalmente trabajan a 4 -10 días de retención.
- **Requisitos mecánicos:** estos sistemas necesitan de apoyo mecánico extra, como sistemas de agitación para mantener la biomasa suspendida y asegurar el flujo del agua. También, es necesario mantener una cosecha de las algas generadas para que el reactor tenga una alta tasa de crecimiento y, con ello, una alta tasa de eliminación de contaminantes. Por último, puede ser necesario inyectar o aportar fuentes de carbono inorgánico, como el CO_2 , ya que la actividad bacteriana puede estar muy limitada.



En estos reactores, una parte importante del mantenimiento reside en el **cosechado de las algas**, una tarea mecánica que alberga cierta complejidad. Puede ser retenida mediante filtraciones con membranas o equipos centrífugos, siendo esta etapa la que mayor demanda energética requiere de todo el sistema. Por este motivo, se sigue investigando y desarrollando diferentes formas de cosechado de las algas que reduzcan el consumo energético, como la **autofloculación**. Es decir, fomentar ciertos procesos metabólicos propios de las algas que provocan que estas se aglutinen, facilitando así su extracción de la corriente líquida (Kandasamy et al., 2023). Por otro lado, la carga de nutrientes no puede ser excesiva, ya que un exceso de nutrientes, como el amonio, puede provocar efectos inhibitorios en las algas, reduciendo su actividad biológica o, incluso, causando su muerte.

En cuanto a los rendimientos de tratamiento, esta etapa está enfocada prácticamente en la eliminación de nutrientes, pudiendo alcanzar eficiencias superiores al 90 %, tanto para el nitrógeno como para el fósforo, mientras que la materia orgánica es eliminada en menor medida (Young et al., 2017).

Maduración

Por último, las **lagunas de maduración** son las menos profundas, ya que su objetivo principal es asegurar la desinfección del agua mediante la radiación solar. Al exponer durante un largo periodo de tiempo las bacterias a la acción solar, se logra reducir su actividad biológica provocando su muerte (Von Sperling, 2007). También pueden ocurrir procesos de afino de eliminación de contaminantes, pero no es el objetivo principal ya que, a mayor presencia de contaminantes, mayor desarrollo de algas y bacterias, incrementando así la turbidez del agua. Como consecuencia, se reduciría la penetración de la radiación solar mitigando, por tanto, su efecto desinfectante.

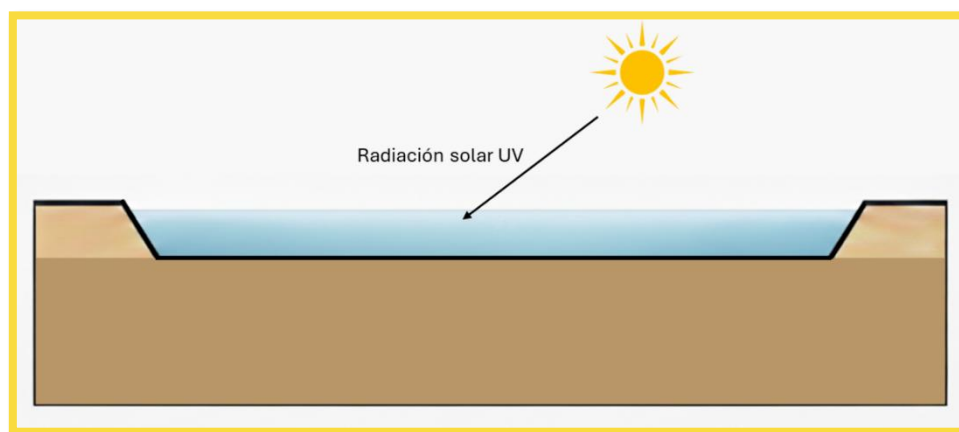


Figura 34. Esquema de un lagunaje madurativo.
Fuente: elaboración propia.



- **Profundidad:** son las lagunas menos profundas, con una profundidad de 0,5 a 1 m comúnmente (Von Sperling, 2007).
- **TRH:** elevados, llegando a superar los 20 días de contacto para asegurar la completa eliminación de patógenos. Este tiempo dependerá de la carga microbiológica y de otros aspectos, como el número de horas de sol o el ángulo en que la radiación solar es recibida (Von Sperling, 2007).
- **Ancho:** en estas lagunas también es preferible una configuración alargada (Von Sperling, 2007).

También es importante controlar el crecimiento de organismos que puedan bloquear la luz, como plantas o algas. Para ello, es necesario ajustar el diseño de las etapas anteriores, con el objetivo de asegurar una buena calidad de esta. En este caso, dado que no se espera crecimiento de organismos, la eliminación de depósitos del fondo es muy espaciada en el tiempo. Durante esta etapa no deberían presentarse problemas de olores, ya que el agua se encuentra ya tratada.

En cuanto a sus rendimientos de tratamiento, la eliminación de contaminantes como materia orgánica o nutrientes es baja, alcanzando valores de hasta el 50 % del valor de entrada. Cabe recordar que, en un esquema convencional, los valores de entrada a esta etapa son relativamente bajos, por lo que, aunque un porcentaje del 50 % pueda parecer elevado, en términos absolutos de gramos eliminados al día, estas etapas presentan tasas bajas comparadas con las anteriores. Sin embargo, su punto fuerte está en la reducción de patógenos. En la fase de maduración se puede llegar a reducir hasta en un 99,9 % la presencia de coliformes fecales (bacterias patógenas) (Calabrò et al., 2024). En algunos sistemas de lagunaje esta etapa final es sustituida por un canal donde se instalan lámparas ultravioletas (la radiación que ejerce el efecto desinfectante) con el objetivo de reducir los requisitos de superficie de todo el sistema (Wang & Wang, 2025).

Humedales construidos

Los **humedales construidos** pretenden simular el comportamiento de un humedal natural. En estos ecosistemas artificiales coexisten los tres mecanismos de actuación ya explicados: infiltración, fito y ficorremediación y actividad bacteriana. Por lo tanto, se trata de **un complejo y completo sistema de purificación capaz de abordar diferentes retos o problemas de forma simultánea**. Estos humedales son capaces de purificar el agua residual recibida, a la vez que también ayudan a laminar las avenidas de agua. En épocas estivales, los humedales artificiales permiten reducir la temperatura del entorno y mejorar la sensación térmica, gracias a la evapotranspiración. Desde el punto de vista ambiental, los seres vivos no diferencian



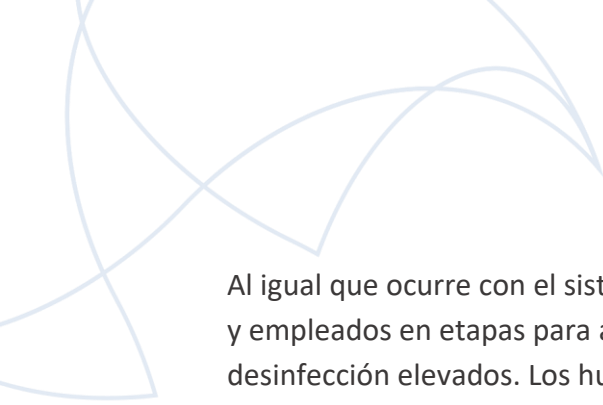
estos entornos antropizados de un humedal completamente natural, por lo que pueden albergar una amplia variedad de insectos, aves, organismos acuáticos... Además, dado su alto grado de integración ambiental, los humedales construidos son recursos útiles en la divulgación y educación ambiental: para explicar vías de intervención o para restituir los ambientes degradados sin recurrir a infraestructuras grises. Estos entornos también pueden aportar un beneficio adicional al permitir la recarga de acuíferos subterráneos e incrementar la superficie permeable de un territorio.



*Figura 35. Humedales construidos en Lixnaw, Kerry.
Fuente: VESI Environmental (2021).*

Los humedales artificiales pueden ser construidos para el tratamiento de aguas grises, aguas urbanas o aguas industriales, según su diseño y el pretratamiento que se aplique. Aunque no existen unas dimensiones mínimas para su implantación, es importante señalar que para poder representar un ecosistema complejo como es un humedal, no deben diseñarse de tamaño reducido, ya que, aunque puedan cumplir adecuadamente con el objetivo de tratamiento de agua si el caudal o la carga contaminante son bajos, no ofrecerá el resto de los beneficios ambientales y sociales.





Al igual que ocurre con el sistema de lagunajes, los humedales pueden ser combinados y empleados en etapas para alcanzar niveles de eliminación de nutrientes y de desinfección elevados. Los humedales, al depender de actividades biológicas, van a estar condicionados por la climatología del entorno, por lo que es necesario que las especies vegetales seleccionadas sean autóctonas de la región y se dimensionen de acuerdo con la cinética esperada en base a la temperatura promedio.

De forma general, en los humedales, el agua va a interactuar tanto con el medio filtrante, reteniendo material particulado y propiciando la infiltración, como con las raíces de las plantas, para asimilar o degradar los contaminantes, así como con las bacterias, para completar el tratamiento. La clasificación de los diferentes humedales se basa en la dirección en la que fluye el agua y en el tipo de vegetación empleada.

Flujo vertical

Los **humedales de flujo vertical** tienen gran similitud con los lechos de infiltración lenta. El agua es aplicada a las capas de vegetación superficial y se va infiltrando hasta el fondo del vaso de tratamiento. En este caso, al tratarse de un vaso impermeabilizado, el agua no continúa su recorrido hasta las capas freáticas, sino que es dirigida hacia un extremo para evacuarla. En el fondo del vaso es necesario añadir una conducción de aireación que permita el intercambio de gases en la parte inferior, para evitar zonas anóxicas y favorecer el flujo del agua.

En este tipo de humedales cabe destacar la actividad de dos agentes. Por un lado, la vegetación es el núcleo de tratamiento, no solo por su papel activo en la absorción y asimilación de nutrientes y contaminantes, sino también por su capacidad para dotar de actividad biológica al suelo. Esta actividad biológica, llevada a cabo por las bacterias, es principalmente aerobia, debido a las conducciones de reaireado, por lo que tendrán lugar procesos de degradación de la materia orgánica y nitrificación, pero no la desnitrificación (Stefanakis et al., 2014).

Debido a que la actividad de las bacterias en medios aerobios no es capaz de reducir significativamente la presencia de fósforo, los sistemas convencionales no son adecuados para este tipo de contaminante. Sin embargo, es posible combinar el sustrato de la vegetación con medios reactivos que presentan una mayor afinidad por los iones de ortofosfato. Estos medios actúan de manera análoga a como lo haría un lecho de resinas o zeolitas (ampliamente aplicado en el sector industrial), reteniendo los iones de ortofosfato hasta que se encuentran saturados. Sin embargo, se debe controlar la profundidad y la proporción del medio reactivo para no afectar a la permeabilidad del conjunto ni a la disponibilidad de nutrientes para la vegetación. De



manera general, se pueden aplicar los siguientes parámetros de diseño (Pucher & Langergraber, 2019):

- **Estructura del suelo:** el suelo presenta una profundidad cercana a 1 m. La granulometría va cambiando desde la superficie, donde se distribuye arena u otro material de una granulometría fina hacia la capa inferior de drenaje de grava, donde el material puede llegar a tener hasta 3 cm de diámetro.
- **Pretratamiento:** para este sistema es indispensable incluir una etapa previa de desbaste que elimine sólidos y otro material particulado para evitar la colmatación del lecho.

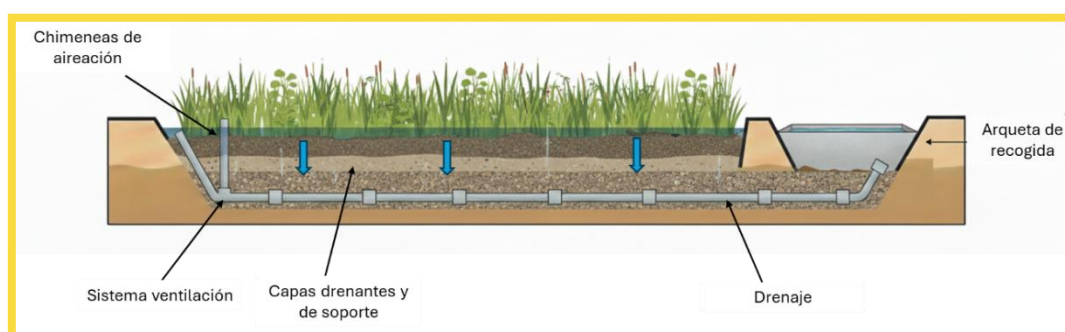


Figura 36. Esquema de humedal de flujo vertical.
Fuente: elaboración propia.

En estos sistemas es importante hacer un control periódico de la vegetación que crece para ir eliminando la maleza, ya que podría afectar a la cubierta vegetal principal. Cuando se emplea un medio reactivo, es importante considerar que este lecho debe ser renovado frecuentemente, en función de su capacidad de retención y de la carga de fósforo en la entrada.

Este sistema puede llegar a eliminar el 90 % de la materia orgánica y del amonio. Cabe señalar que el nitrógeno total tan solo se reduce en menos del 50 %, porque una parte del nitrógeno es oxidado hacia otras formas, como nitratos, pero no es transformado a nitrógeno gas, ya que por sus condiciones aerobias no puede tener lugar la desnitrificación. Cuando se emplea un medio reactivo, la eliminación del fósforo puede llegar a ser completa (Stefanakis et al., 2014).

Flujo vertical tipo francés

Los **humedales tipo francés** son una variante reciente de los humedales verticales convencionales. Estos sistemas funcionan de una forma muy similar a la ya explicada,



pero presentan una serie de ventajas, a costa de una mayor superficie de implantación. En primer lugar, aunque es aconsejable realizar un desbaste de sólidos gruesos, no es necesario realizar un desbaste de sólidos finos. En su lugar, el agua es llevada a un primer humedal con arenas gruesas. Estas arenas interceptarán los sólidos finos y el material particulado. Al presentar el lecho una granulometría gruesa, se evita su colmatación. El material se irá depositando poco a poco hasta generar un fango sobre el lecho. Suele ser recomendable disponer de varios humedales en paralelo para poder alternar la carga de agua. En el momento en que en un humedal se ha generado una capa de fango, se distribuye el agua a otro humedal y este queda en reposo. Durante este tiempo (aproximadamente una semana), el lodo se puede secar y mineralizar correctamente. Cuando ya esté mineralizado, el humedal puede volver a recibir agua bruta (Manjate et al., 2015).

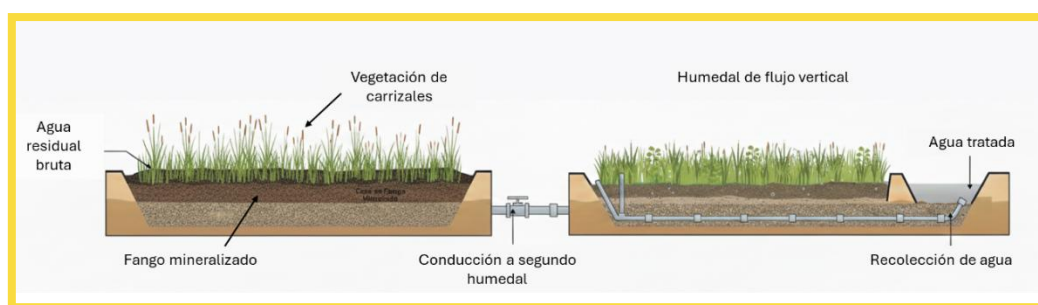


Figura 37. Esquema de humedal tipo francés.
Fuente: elaboración propia.

Al ir alternando los humedales de recepción, se puede ir generando una capa de lodo estable y mineralizada, sin necesidad de emplear equipos mecánicos. Esta capa de lodo deberá ser retirada cada 8 años (o más) y puede ser empleada como enmienda orgánica en el campo, debido a que se encuentra estabilizada.

Posteriormente, el agua tratada en este primer humedal es llevada a un segundo humedal vertical, donde tiene lugar un proceso similar al explicado en el anterior apartado. Esta combinación de humedales permite abordar aguas grises y residuales domésticas sin tratamiento previo. Para el primer humedal es recomendable seguir los siguientes requisitos de diseño:

- **Estructura del suelo:** de una alta porosidad que facilite el drenaje, pero a la vez permita retener material particulado. Se debe realizar un gradiente de granulometría, aplicando la capa más fina en la superficie, con un tamaño sobre 5 mm hacia arriba (Paing et al., 2015).



- **Número de humedales:** el número de humedales necesarios para realizar la alternancia depende de varios factores, como la carga de sólidos recibidos o la temperatura promedio. En climas más cálidos, la actividad bacteriana se acelera junto con la evaporación. De forma general, se recomienda disponer de tres humedales en paralelo, para trabajar con uno mientras los otros dos están en descanso (Manjate et al., 2015).

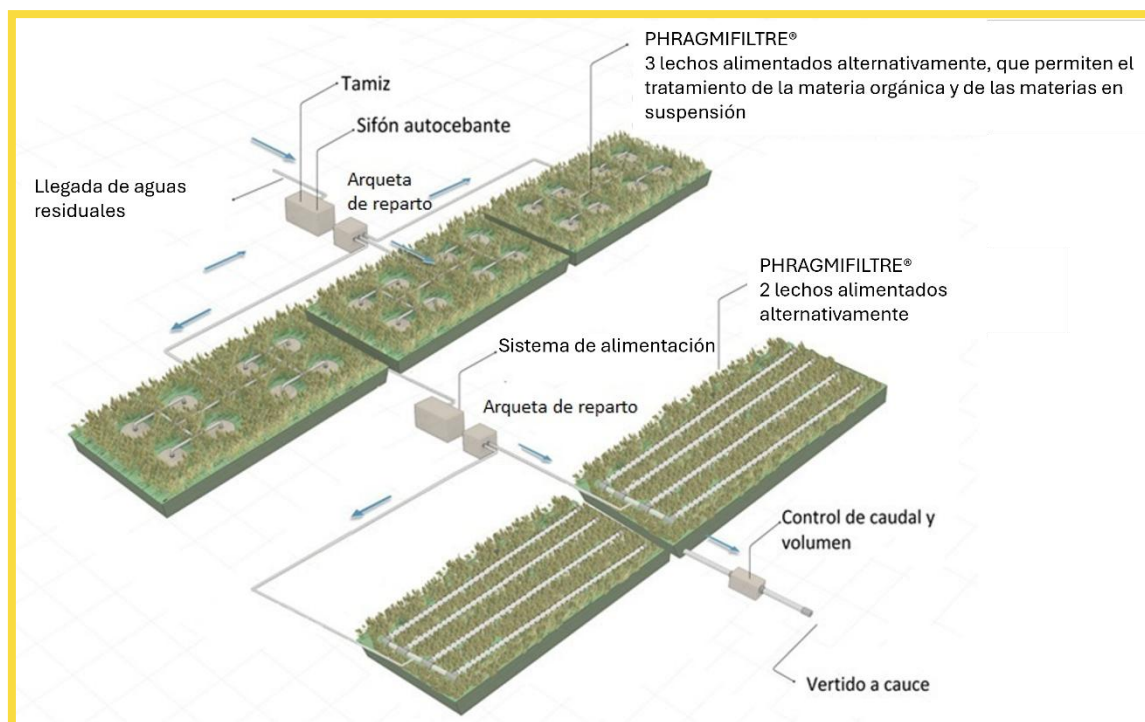


Figura 38. Configuración convencional de un humedal tipo francés.
Fuente: Salas (2018).

Estos sistemas permiten incrementar los rendimientos de tratamiento, ya que la eliminación de los sólidos suspendidos (junto con los contaminantes asociados) es superior al 90 % (Paing et al., 2015). Un reciente caso de éxito de implantación de un sistema francés se recoge en el artículo de Arévalo-Durazno et al. (2024), en el que se emplea este sistema para el tratamiento de aguas residuales urbanas. Estos autores evalúan los primeros meses de implantación de un humedal tipo francés y recogen que la DQO se ha podido reducir en un 90 % tras varios meses. Además, los sólidos se han logrado retener en un 70 %. Los autores señalan que un aspecto importante y que fue un parámetro de seguimiento clave en los primeros meses fue el estado de la cobertura vegetal de la primera etapa. Por último, indican que se observó un incremento de la mineralización del fango recogido en la primera etapa, confirmando la capacidad de tratamiento de fangos que presenta esta configuración.



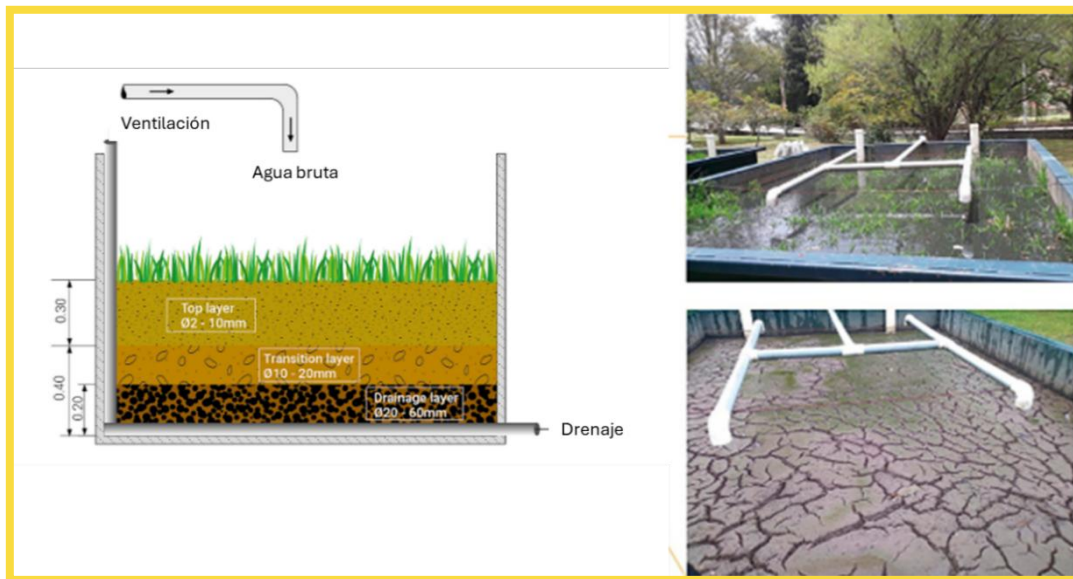


Figura 39. A la izquierda, esquema y capas que presenta el primer humedal. A la derecha, estado del humedal cuando recibe el agua bruta y tras el periodo de reposo y mineralización del fango.
Fuente: modificado de Arévalo-Durazno et al., (2024).

Flujo horizontal

En los **humedales de flujo horizontal** el agua circula únicamente por el lecho y por la zona radicular, sin llegar a desplazarse en el eje vertical. En este caso, el medio se encuentra completamente saturado y no existen canales de aireación, por lo que se pueden dar condiciones anóxicas que propicien la desnitrificación. Al igual que ocurre en los otros humedales, la actividad de la vegetación y las bacterias es clave para el tratamiento del agua. La eliminación de los sólidos provoca que el lecho se vaya obstruyendo lentamente, por lo que, para reducir los costes de mantenimiento, se recomienda un tratamiento primario para las aguas residuales o grises que tratar.

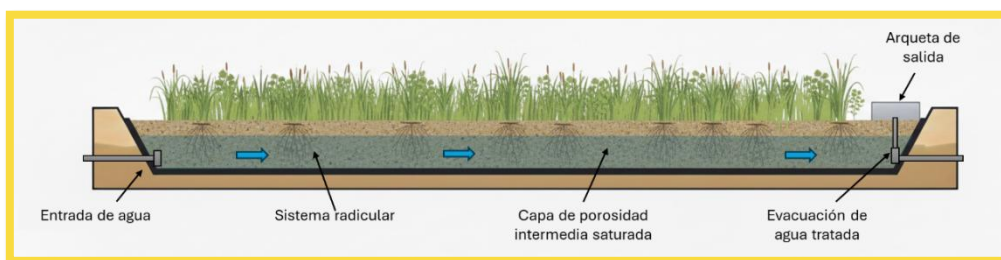



Figura 40. Esquema de humedal de flujo horizontal.
Fuente: elaboración propia.

Gracias a su capacidad de generar zonas anóxicas, este humedal puede ser aplicado como postratamiento de un humedal vertical. De esa manera se reduce el contenido particulado que llega al humedal horizontal a la vez que se incrementa la eliminación





global de nitrógeno, gracias a los procesos de desnitrificación. De igual manera puede ser aplicado con los humedales de flujo libre. Para su instalación se recomienda (García et al., 2005):

- **Estructura del suelo:** uniforme, con una granulometría intermedia. Un suelo fino puede provocar obstrucciones fácilmente, pero un suelo con una granulometría muy porosa reducirá su capacidad depurativa a la vez que complica la fijación de las plantas.
- **Carga de sólidos:** este parámetro va a delimitar la vida útil del humedal antes de reemplazar el material del lecho. Se recomienda no superar una carga de 10 g de sólidos suspendidos por metro cuadrado de lecho al día.

Este lecho puede dar problemas de olores debido a las etapas anóxicas, anaerobias o por colmatación de sólidos, por lo que debe tenerse en cuenta a la hora de ubicarlo. También, como en el resto de los humedales, es necesario hacer un control de la vegetación que crece sobre el lecho.

Los rendimientos de este humedal no son elevados, ya que solo actúan las capas bajas de la rizosfera (o hasta donde llegue la saturación) y el oxígeno está limitado. Por ello, los rendimientos reportados de eliminación de nutrientes son bajos, inferiores al 50%. Sin embargo, como se ha explicado previamente, esta etapa puede servir de afino ya que es capaz de eliminar nutrientes como el nitrato, algo que no ocurre en los humedales verticales (Vymazal & Kröpfelová, 2008).

En caso de que se aporte una alta tasa de materia orgánica o se requiera eliminar una mayor cantidad de nitrógeno, se puede modificar el humedal para incrementar su eficiencia, a costa de un mayor consumo energético. Es posible incluir un sistema de aireación en el fondo del humedal para mantener aireado el sistema o aportar una aireación intermitente. En el caso de una aireación intermitente, se puede combinar una mayor velocidad de consumo de materia orgánica con procesos de desnitrificación (Pan et al., 2012).

Este tipo de implantaciones pueden dar soluciones a entornos urbanos disgregados y con baja población, como en el caso de Galicia. En Boimorto, diseñaron y pusieron en marcha un humedal de flujo horizontal para tratar las aguas residuales urbanas del municipio. El agua residual primero llega a una fosa séptica que sirve de desbaste para los sólidos gruesos. Posteriormente, se conduce a dos humedales de unos 300 m² cada uno. El humedal tiene una capa de grava de 30 mm con un espesor de 60 cm, además, está plantado con juntas convencionales. Este sistema actúa como la principal etapa de tratamiento de esta agua residual y se ha reportado la eliminación de la materia



orgánica entre el 60 %-70 %. Sin embargo, durante la mayor parte del año, la eliminación del nitrógeno es de tan solo del 37 %, debido a que su saturación limita las condiciones aerobias. Pero, en junio y julio, cuando la carga de agua es menor, se han podido registrar tasas de eliminación de nitrógeno de hasta el 87 % (Jácome et al., 2016).



*Figura 41. Fotografía del estado del humedal en 2012 y en 2014.
Fuente: CITEC (2015).*

Flujo libre

Este tipo de humedales presentan una apariencia más cercana a los humedales naturales, ya que en este caso el agua no se encuentra contenida en un lecho, sino libre en una columna de agua de profundidad variable. Mientras que en los humedales de flujo vertical y horizontal la vegetación es principalmente emergente (es decir, parte de un lecho), en este caso se combinan con vegetación flotante y sumergida. Así, el lecho reduce su importancia en el tratamiento, recayendo principalmente la depuración en la vegetación y en las bacterias libres y adheridas sobre las raíces. Son las raíces de las plantas las que hacen de soporte para los microorganismos y las que también pueden llegar a retener material particulado fino.

Estos sistemas son más robustos a las fluctuaciones en el caudal de entrada y a la carga de contaminantes y presentan un consumo energético mínimo. Además, debido a que se simplifican sus componentes, su construcción es más sencilla y tiene una integración ambiental más alta que el resto. Estos sistemas pueden ser aplicados para aguas grises o como tratamiento terciario de procesos de depuración convencionales. El agua obtenida puede servir para recargar acuíferos o incluso puede ser empleada directamente en agricultura. También puede ser integrado en un sistema de lagunaje como etapa de afino final (Ghermandi et al., 2007). En este caso, el diseño debería contemplar lo siguiente (Carleton & Montas, 2010):



- **Tiempo de residencia:** al menos de 12 horas, para asegurar que las plantas tienen el tiempo de contacto suficiente.
- **Balance de nutrientes:** debido a que el principal mecanismo de actuación son las plantas, es importante considerar que los nutrientes (o contaminantes) se encuentran en una proporción adecuada para la vegetación seleccionada. Una proporción muy desbalanceada provocará que un nutriente ejerza como factor limitante, reduciendo considerablemente el rendimiento global del tratamiento.

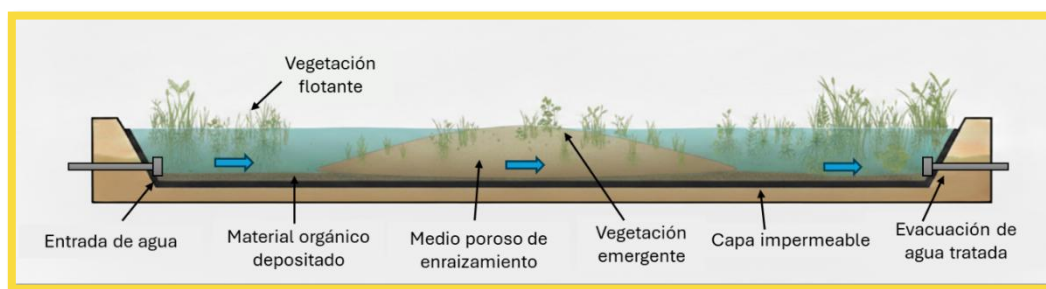


Figura 42. Esquema de humedal de flujo libre.
Fuente: elaboración propia.

Cabe señalar que, debido a que el tratamiento se basa en la actividad biológica, y esta no es regulada (a diferencia de una infraestructura gris), los rendimientos pueden presentar variaciones a lo largo del año. Por otro lado, a medida que la vegetación va muriendo o se va desprendiendo parte de ella, se irá depositando en el fondo y comenzará a degradarse, liberando nutrientes al medio, por lo que es importante mantener el control y limpieza de plantas. También puede haber una sedimentación de sólidos si el pretratamiento no es el adecuado, provocando una colmatación del humedal, con la consecuente reducción del tiempo de residencia hidráulica.

Un sistema bien diseñado debe ser capaz de eliminar hasta el 90 % de la materia orgánica, medida como DQO, junto con 60 %-80 % de nutrientes como fósforo y nitrógeno (Carleton & Montas, 2010).

Restauración ecosistemas naturales

Siguiendo la estructura de este capítulo, finalmente se explicarán aquellas SBN con una mínima intervención humana. Este tipo de soluciones se basan en **mantener y restituir ecosistemas naturales** como los humedales, llanuras de inundación, manglares o marjales, entre otros ecosistemas, para que puedan seguir ofreciendo servicios ecosistémicos. Los ecosistemas varían según el territorio y la geografía, pero, además, el contexto también afecta a los beneficios esperados del ecosistema natural. En



En Europa estos espacios se protegen por su alto valor ecológico y por los beneficios ambientales y sociales que ofrecen (protección de la biodiversidad, secuestro de carbono, reducción del efecto de la isla de calor, zona de recreo...) ya que el agua que llega a estos entornos debería presentar una alta calidad debido a la estricta legislación en materia de vertidos y el desarrollo de una infraestructura adecuada para la restitución del agua residual antes de su vertido. De hecho, cuando se realiza un vertido a una zona húmeda de alto valor ambiental (denominadas zonas sensibles), como puede ser la Albufera de Valencia, las Tablas de Daimiel o el Parque Nacional de Doñana, por ejemplo, se establecen límites de vertido aún más estrictos para minimizar el impacto ambiental derivado del agua residual aportada.

Sin embargo, en otros países donde la legislación de vertidos es más laxa o se ha podido invertir menos en sistemas de tratamientos de aguas residuales, estos entornos también cumplen una función depurativa del agua. Un claro ejemplo es el humedal del este de Calcuta, India (RAMSAR, 2022). Este humedal, de unas 12.500 hectáreas, está protegido por el convenio RAMSAR (un acuerdo internacional de protección de zonas húmedas) por su alto valor ecológico. Sin embargo, junto a estas funciones ambientales conviven dos actividades humanas. Por un lado, estos humedales se emplean como zonas de cultivos por su alta fertilidad, pero, por otro, también son zonas de descarga del agua residual de la ciudad, por lo que las plantas pueden absorber los nutrientes de esa agua. De esta manera, el humedal proporciona un ecosistema con una alta biodiversidad, regula las crecidas y permite recargar acuíferos, a la vez que son una zona de cosecha y sirve como sistema de tratamiento de aguas grises.



Figura 43. Fotografía del humedal y el límite de la ciudad.
Fuente: Das & Mukherjee (2023).



Conociendo que en Europa estas SBN cumplen otro tipo de funciones más allá del tratamiento del agua, en cada uno de los apartados de estas SBN se explicarán los beneficios ambientales y sociales esperados, sin entrar a detallar los porcentajes de eliminación de contaminantes.

Por último, cabe señalar que, aunque este tipo de actuaciones suelen recaer en entes públicos y que la restauración y mantenimiento pueden estar apoyados con fondos europeos o nacionales a través de proyectos de investigación, las empresas también pueden contribuir al mantenimiento y mejora de estos ecosistemas naturales. Como ya se recogía en el proyecto *Mejora de la resiliencia de la industria frente al estrés hídrico*, (Fundación Renovables, 2025), las empresas a veces se involucran y lideran proyectos de restitución y protección de zonas húmedas para mejorar tanto su huella de agua como su imagen ambiental. Algunos ejemplos son los que lleva a cabo Coca Cola en espacios como la Albufera de Valencia, las Tablas de Daimiel o los Montes de Teruel (Coca Cola, 2024) o Heineken, tal y como reflejan en su memoria de sostenibilidad (Heineken, 2024).



Figura 44. Memoria de sostenibilidad de Heineken (2024), en la que dentro del apartado dedicado a los impactos hídricos muestran los beneficios conseguidos por sus planes de restitución.
Fuente: Memoria de sostenibilidad de Heineken (2024)



Humedales naturales

Los **humedales naturales** tienen un comportamiento similar a los humedales de flujo libre. En estos ecosistemas conviven especies vegetales flotantes, emergentes y sumergidas que, junto con la acción bacteriana, mantienen la calidad del agua. En este caso, la acción humana se limita al mantenimiento y restitución del humedal, ya que al tratarse de entornos naturales no se contemplan factores de diseño y construcción, como si ocurre en el resto de las SBN detalladas. El valor ambiental de estos espacios reside en su papel como **ecosistema de transición**. En humedales y otras zonas húmedas similares, como pantanos, conviven aspectos propios de ecosistemas acuáticos y terrestres. Este es uno de los motivos por los que son puntos de alta biodiversidad. Además, debido a esta particularidad, los humedales son zonas muy fértiles, lo que conlleva la explotación agrícola parcial de estos territorios. El rápido crecimiento de la vegetación en estas áreas favorece el secuestro de carbono, por lo que, a pesar de cubrir tan solo el 5 % de la superficie de la tierra, a los humedales se les atribuye hasta el 30 % de la captura de CO₂ global (Y. Zhang et al., 2025).

Adicionalmente, estos espacios incrementan la humedad del territorio, ayudando a reducir la temperatura local. Un estudio realizado en la Ciudad de México en 2020 midió un incremento de 2 °C por cada 35 m de distancia de masas de agua como los humedales (Roggeri, 1995). Este efecto es importante tanto en entornos rurales como urbanos. En zonas rurales de interior es importante disponer de fuentes que aporten humedad al aire para que, en los meses de verano, más secos y calurosos, se pueda reducir el riesgo de incendio. En un estudio de Taufik et al. (2018) observaron cómo el riesgo de incendio se incrementaba hasta 4,5 veces en zonas donde los humedales se habían degradado o drenado. En entornos urbanos, las grandes masas de agua ayudan a contrarrestar el llamado efecto de isla de calor urbana.

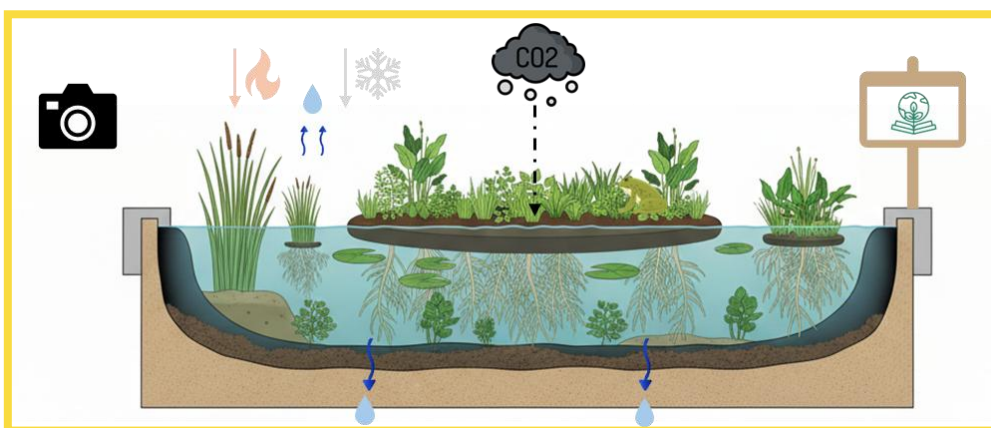
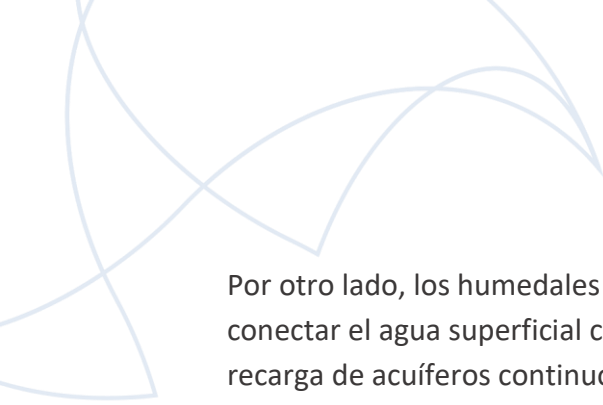


Figura 45. Principales beneficios de los humedales naturales: captura de carbono, recarga de acuíferos, reducción de la temperatura y de riesgo de incendios, incremento de la biodiversidad, valor paisajístico y educación ambiental. Fuente: elaboración propia.





Por otro lado, los humedales pueden actuar como grandes reservorios de agua al conectar el agua superficial con el agua subterránea, convirtiéndose en un sistema de recarga de acuíferos continuo y de calidad, dado que el sistema presenta capacidades autodepurantes. También son de gran ayuda en episodios de tormentas o avenidas, ya que permiten laminar el agua, reducen el caudal de la escorrentía y son zonas permeables. Por todo esto, se consideran una herramienta de mitigación del cambio climático que debería tenerse en cuenta en entornos vulnerables.

Por último, estas zonas tienen un impacto positivo social directo, ya que suelen ser reclamo turístico, fomentando la economía local. Además, suelen ser espacios empleados para la divulgación y educación ambiental.

Al tratarse de entornos que no son construidos por la acción humana, no se puede hablar de parámetros de diseño. Sin embargo, requieren de un mantenimiento y cuidado para preservar sus beneficios ambientales. Es importante llevar a cabo una vigilancia de las especies vegetales del humedal para mantener las autóctonas y eliminar especies invasoras. En algunos casos es necesario habilitar ciertas infraestructuras grises que ayuden a recuperar el humedal si este se encuentra degradado. Las intervenciones de restitución pueden incluir la integración de canales de recarga del humedal (que previamente se habrían reconducido o desviado por cuestiones urbanísticas o de otra índole), correcciones de la pendiente de los márgenes de las masas de agua para minimizar la erosión y facilitar la transición entre ecosistemas o, incluso, sistemas de control del flujo del agua de entrada y de salida del humedal.

Las restauraciones de los humedales suelen ser procesos de larga duración y van a depender del estado inicial del humedal y de su extensión. En los procesos de restauración a veces es necesario incluso retirar el lecho del humedal. Esto suele ocurrir cuando el humedal presenta un alto grado de degradación y ha ido acumulando desechos y materia muerta. Estos restos biológicos que quedan atrapados en el fondo van liberando nutrientes al medio en exceso, a la vez que las bacterias consumen el oxígeno para degradar la materia orgánica. En estas situaciones, es complicado revertir el estado natural del humedal sin renovar el sustrato. Por ello, en estos casos extremos **es recomendable retirar la capa superior del lecho y sustituirla por un lecho sano que no libere contaminantes a la columna del agua.** A veces, también se requieren sistemas activos de tratamiento del agua del humedal porque si este ha pasado por procesos de eutrofización el lecho del humedal actúa como foco de nutrientes. En estos casos, es necesario complementar infraestructuras grises con esta SBN (Zhao et al., 2016). El delta del Río Amarillo, en China, es un ejemplo de un humedal degradado



por la acción humana (urbanización, alta captación de agua y prácticas agrarias intensivas), pero, desde 2001, se está trabajando en su restauración. Uno de los puntos que se ha trabajado es la restauración de la microbiota del humedal, junto con una mayor densidad de vegetación autóctona. Esta combinación ayuda al sistema a ganar resiliencia ante la presencia de contaminantes en el agua. Además, se han estado llevando a cabo prácticas para incrementar el caudal de agua aportado a esta masa de agua (Li et al., 2022; Wang et al., 2025).



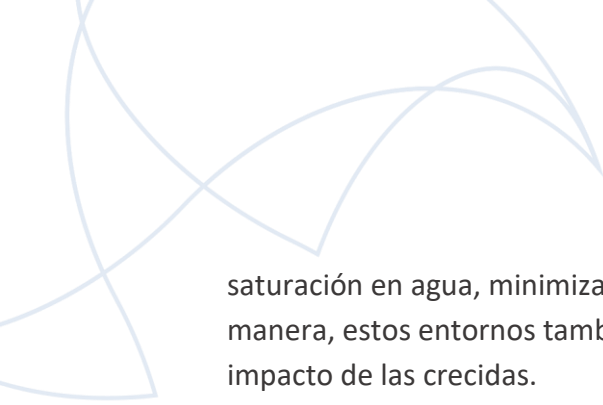
Figura 46. Fotografía del delta del Río Amarillo en China, tras su recuperación.
Fuente: Shangwu & Ruixue (2023).

Riberas y llanuras de inundación

La restauración de riberas y llanuras de inundación es una de las SBN más aplicadas en cualquier territorio, por dos motivos principales: porque, prácticamente, todos los entornos urbanos disponen de una zona fluvial dentro de sus límites y porque los parques fluviales ofrecen una serie de beneficios sociales y ambientales con un relativo bajo coste. Por ello, hoy es común encontrar en las ciudades europeas actividades de transformación de las riberas de los ríos para proveer de espacios verdes que cumplan diferentes propósitos.

Al igual que en los humedales, los ríos y riberas son zonas muy fértiles, debido a los sedimentos que puede arrastrar el agua. Por ello, el crecimiento de la vegetación es muy rápido, propiciando así un nuevo sumidero de CO₂. La materia orgánica atrapada en los sedimentos se va mineralizando lentamente gracias a las condiciones de





saturación en agua, minimizando las emisiones de CO₂ (Loria & Lal, 2025). De igual manera, estos entornos también ayudan a laminar avenidas de agua y a minimizar el impacto de las crecidas.

La principal diferencia con los humedales es que las riberas de los ríos son más accesibles. Por ello, estos espacios suelen ser transformados en ambientes de recreo y ocio, donde se puede disfrutar de una serie de ventajas ambientales, como una menor temperatura y exposición a la radiación solar y un clima más estable.

La restauración de ecosistemas fluviales suele conllevar una **fase de revegetación**. Tradicionalmente, las llanuras y riberas de los ríos no han sido objeto de mantenimiento, favoreciendo el crecimiento de todo tipo de plantas en los márgenes y fondo del cauce. Por este motivo suele ser necesario hacer limpiezas del río para aclarar los márgenes y dar espacio para que crezcan las plantas de una forma más ordenada, ayudando al propio río a preservar su diversidad, manteniendo zonas de acceso y claros y evitando zonas altamente pobladas por la vegetación. También es importante asegurar que la vegetación empleada sea autóctona y que se controla el crecimiento de especies invasoras.

Cuando se lleva a cabo una restauración de una ribera o de una llanura de inundación, es importante permitir la conexión entre diferentes ecosistemas. Es decir, eliminar barreras como azudes o saltos de agua en el río y canalizaciones no naturales y permitir la inundación de las zonas aledañas al río en las épocas de crecida (Mason et al., 2025). Al favorecer el movimiento natural del agua se mejora su capacidad para laminar las crecidas. Además, permite ser el punto de unión entre diferentes áreas ecológicas y mantiene bien nutridos y oxigenados los márgenes del río. En Hinshaw & Wohl (2023) señalan que es posible mejorar hasta en un 26 % la capacidad de secuestro de carbono tras restaurar la ribera de un río, debido a que aumenta su capacidad máxima de almacenamiento de carbono, se incrementa el alcance de influencia del río y mejora el crecimiento vegetal.

Un claro ejemplo de este tipo de solución es el parque Madrid Río. Tras soterrar la M-30 se ha podido restaurar el Río Manzanares a su paso por Madrid. Actualmente, este parque fluvial tiene una extensión de 649 hectáreas. Debido al alto grado de urbanización de esta área, el suelo se encontraba previamente muy degradado y había una alta pérdida de biodiversidad en el entorno. Sin embargo, al soterrar la M-30, ampliar el corredor verde (con más de 30.000 árboles plantados), generar espacios inundables y restaurar las riberas (con plantaciones de olmos, entre otras especies vegetales), ha sido posible revertir la situación de este espacio natural (Perini, 2017).



Se ha observado cómo este espacio es empleado por hasta 50 especies de aves distintas y ha retornado la fauna piscícola, como el barbo. No solo ha mejorado su biodiversidad, sino que, al implantar nuevas pasarelas y caminos de acceso, se ha optimizado la conexión del sureste de Madrid y la ciudadanía ha ganado una amplia extensión de recreo y ocio con un microclima particular gracias a la abundante vegetación (Comunidad de Madrid, 2018).



Figura 47. Fotografía del estado previo (izquierda) y del actual tras la restauración (derecha) del río Manzanares.
Fuente: Congress for the new urbanism, 2012



Conclusiones

**Nuevas oportunidades para la
gestión sostenible del agua**



**FUNDACIÓN
RENOVABLES**

Conclusiones

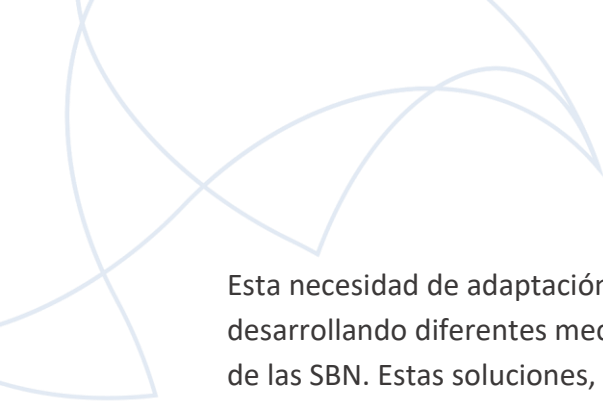
Los retos hídricos actuales en materia de calidad y cantidad hacen necesario **replantear nuestra forma de abordar la gestión integral del agua.**

Convencionalmente, se han implementado soluciones de las llamadas “infraestructuras grises”, que han permitido mantener los estándares de calidad del agua de forma general, aunque con algunas deficiencias, tal y como se puede observar en el estado de los acuíferos de algunos puntos del territorio español. La mayor presión sobre los recursos hídricos, junto con un cambio legislativo hacia un modelo que incrementa su protección, hacen necesario adaptar y evolucionar la forma de gestión del agua hacia sistemas más resilientes, con una mayor integración en la naturaleza y que permitan un mayor grado de restitución del agua, minimizando el impacto ambiental global o incluso revirtiéndolo.

En este sentido, las SBN se han ido posicionando como un conjunto de soluciones complementarias a las infraestructuras actuales. A diferencia de las infraestructuras grises convencionales con las que se busca maximizar la depuración del agua mediante el uso de reactivos, un alto consumo energético y un mantenimiento y control intensivo, **las SBN se apoyan en las dinámicas y cinéticas propias de los procesos naturales**, reduciendo al mínimo la intervención humana. Por lo tanto, son **sistemas multipropósito** en los que la restitución de las aguas es uno de sus múltiples objetivos, pero no el único. Esto permite que, en estas instalaciones, además de mejorar la calidad ambiental de las aguas, se puedan obtener otros beneficios ambientales como el secuestro de carbono, el incremento de la biodiversidad, la reducción de la exposición a riesgos climatológicos como inundaciones o un mayor valor paisajístico.

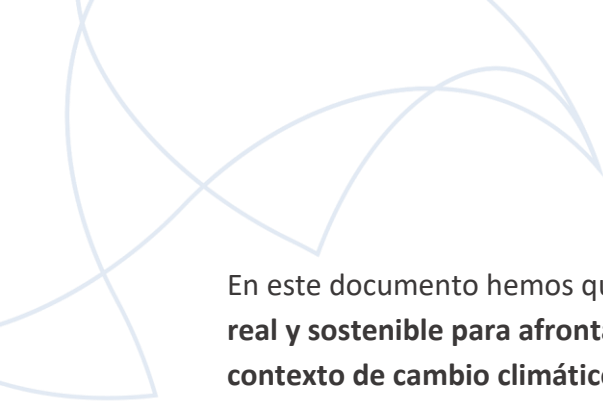
El desarrollo de las SBN tiene un largo recorrido histórico, sin embargo, no fue hasta los años 2000 cuando se acuñó el término de SBN y se comenzaron a establecer marcos de trabajo y de desarrollo común que permitieran mejorar tanto el conocimiento de estas soluciones, como potenciar su desarrollo. Actualmente, existen diferentes grupos de personas expertas trabajando en ampliar el conocimiento de las SBN, así como su divulgación y validación. Estos expertos operan desde diferentes escalas territoriales y áreas de conocimiento. Por ejemplo, desde visiones más internacionales y científico-técnicas, como el clúster de SBN formado por la IWA, a entidades nacionales, como la Plataforma Tecnológica Española del Agua, donde colaboran organismos de diferente naturaleza (universidades, centros tecnológicos, empresas de la gestión integral del agua...).





Esta necesidad de adaptación ha sido recogida por la UE y actualmente está desarrollando diferentes mecanismos que permitan impulsar la aplicación y desarrollo de las SBN. Estas soluciones, son recopiladas en documentos que, aunque no son vinculantes, como pueden ser las directivas o los reglamentos, establecen la hoja de ruta de futuros cambios legislativos o los requisitos para optar a subvenciones europeas, entre otros mecanismos de acción de los que dispone la UE. Por ejemplo, en el Pacto Azul Europeo se han definido acciones y principios que aluden directamente a la integración de las SBN como parte de la estrategia para incrementar la resiliencia hídrica de la UE. Derivado de este documento, en 2025 ha comenzado a operar la *Kick Water*, un conjunto de entidades de diversa naturaleza con la finalidad de impulsar la innovación en materia de agua, tanto en lo relacionado con la economía circular, como en la protección de ecosistemas hídricos o la mitigación de impactos climáticos asociados con el agua. Otros documentos, como la Estrategia Europea de Resiliencia Hídrica o El futuro de la disponibilidad y el uso del agua en la UE, también hacen alusión a la importancia de las SBN como herramienta clave para adaptar la gestión del agua de la UE al contexto de cambio climático.

Finalmente, en el documento se han recogido SBN con diferentes campos de aplicación, ya sea por los contaminantes a los que van dirigidas, el tipo de agua a tratar que permite la tecnología o el espacio de aplicación. Como se ha explicado, las SBN presentan una gran diversidad y pueden ser utilizadas tanto en solitario como acopladas a una infraestructura gris convencional para incrementar el grado de depuración e, incluso, regenerar el agua. Las principales SBN pueden ser implantadas en entornos urbanos, como las fachadas y cubiertas vegetales, los pavimentos drenantes u otros sistemas urbanos de drenaje sostenibles como los parques inundables. También pueden ser tecnologías empleadas en entornos con menos gentrificados, zonas rurales, agrícolas, ganaderas e industriales. Para este tipo de aguas de mayor complejidad existen SBN como los lechos de infiltración, los lagunajes, y sus diferentes combinaciones, y sistemas de humedales construidos allí donde el agua ya ha recibido un tratamiento primario y secundario. En todos los casos se ha demostrado que estas SBN no se limitan al campo de la investigación y el desarrollo, sino que existen ejemplos de su implantación a escala real y, por lo tanto, se dispone de un conocimiento sobre los rendimientos esperados y los mejores parámetros de operación y diseño según el escenario de trabajo. Por último, también se ha reflejado cómo los entornos naturales, como los humedales o riberas de los ríos, también pueden formar parte del sistema de gestión integral del agua. Para que un ecosistema natural pueda actuar como SBN se debe respetar ante todo su función ecosistémica, ya que es la que va a permitir obtener una serie de beneficios ambientales que ninguna infraestructura gris puede aportar en términos de variedad e intensidad.



En este documento hemos querido plasmar cómo **las SBN son una alternativa eficaz, real y sostenible para afrontar los retos hídricos a los que estamos expuestos en un contexto de cambio climático**, ya que se dispone de los conocimientos necesarios para su aplicación y actualmente el marco europeo propicia su integración en las infraestructuras existentes, así como su aplicación para nuevos retos.

Índice de figuras y tablas

**Nuevas oportunidades para la
gestión sostenible del agua**



**FUNDACIÓN
RENOVABLES**

Índice de figuras y tablas

Índice de figuras

Figura 1. Zonas vulnerables a nitratos definidas en 2008 (izquierda) y masas de agua subterráneas afectadas por nitratos en 2022 (derecha).....	5
Figura 2. Nivel de riesgo de estrés hídrico en España.	6
Figura 3. Río Machángara al paso por Quito.	7
Figura 4. Primeros conceptos asociados a las SBN.....	9
Figura 5. Ilustración realizada durante el periodo de Gran Hedor: “La muerte ronda sobre el Támesis”.	14
Figura 6. Combinación de procesos y elementos que pueden tener lugar en un proceso de depuración mediante lagunaje.....	15
Figura 7. Superior: esquema convencional del proceso de depuración de aguas residuales. Modificado de (SafeRack, 2025). Inferior: proceso de lagunaje.....	17
Figura 8. Parque Bishan-Ang Mo Kio.	22
Figura 9. Fotografía del humedal Oroklini.....	23
Figura 10. Logo del Pacto Azul Europeo.	26
Figura 11. Logo del EIT Kick Water.	26
Figura 12. Principales ejes de actuación en materia de resiliencia hídrica en la Unión Europea.....	28
Figura 13. Captura del buscador de proyectos con SBN.	29
Figura 14. Logos de la UICN y la IWA.....	30
Figura 15. Fotografía del 14 Congreso Nacional de Medio Ambiente en el que se fundó el grupo de trabajo específico de SBN.....	31
Figura 16. Logo del IIAMA (2025) y del proyecto NBSPLUS (2025).	32
Figura 17. Estructura de un lecho de infiltración rápida.	36
Figura 18. Fotografía del lago de la Iglesia y las Eras en 2004, antes de la restauración del acuífero (izquierda) y en agosto de 2017 (derecha).	38
Figura 19. Estructura de un lecho de infiltración lenta.	39
Figura 20. Flujo del agua en Sierra de Nevada.	40
Figura 21. Fotografía de la estación de autobuses de Logroño.	41
Figura 22. Fotografía del parque La Marjal en un periodo sin lluvias (arriba) y tras un periodo de lluvias intensas (abajo).....	42
Figura 23. Principales mecanismos de fitorremediación.	44
Figura 24. Sistema de lagunaje con algas (izquierda) y reactor tubular cerrado de producción de algas (derecha).	47
Figura 25. Estructura de un techo verde.	48
Figura 26. Estructura de una cubierta vegetal.	48
Figura 27. Sistema de lagunajes en Ottawa, Ontario.	51



Figura 28. Ejemplo de combinación de sistemas de lagunajes.	51
Figura 29. Mecanismos depurativos que llevan a cabo las bacterias.	52
Figura 30. Esquema de un lagunaje anaerobio.	53
Figura 31. Esquema de un lagunaje facultativo.	55
Figura 32. Laguna facultativa aireada de la planta de celulosa en Tartas (Francia), donde se puede apreciar la espuma y las burbujas en su superficie. En la derecha de la imagen se aprecia el tamaño de la instalación industrial.	56
Figura 33. Esquema de un lagunaje facultativo con alta tasa.	57
Figura 34. Esquema de un lagunaje madurativo.	58
Figura 35. Humedales construidos en Lixnaw, Kerry.	60
Figura 36. Esquema de humedal de flujo vertical.	62
Figura 37. Esquema de humedal tipo francés.	63
Figura 38. Configuración convencional de un humedal tipo francés.	64
Figura 39. A la izquierda, esquema y capas que presenta el primer humedal. A la derecha, estado del humedal cuando recibe el agua bruta y tras el periodo de reposo y mineralización del fango.	65
Figura 40. Esquema de humedal de flujo horizontal.	65
Figura 41. Fotografía del estado del humedal en 2012 y en 2014.	67
Figura 42. Esquema de humedal de flujo libre.	68
Figura 43. Fotografía del humedal y el límite de la ciudad.	69
Figura 44. Memoria de sostenibilidad de Heineken (2024), en la que dentro del apartado dedicado a los impactos hídricos muestran los beneficios conseguidos por sus planes de restitución.	70
Figura 45. Principales beneficios de los humedales naturales: captura de carbono, recarga de acuíferos, reducción de la temperatura y de riesgo de incendios, incremento de la biodiversidad, valor paisajístico y educación ambiental.	71
Figura 46. Fotografía del delta del Río Amarillo en China, tras su recuperación.	73
Figura 47. Fotografía del estado previo (izquierda) y del actual tras la restauración (derecha) del río Manzanares.	75

Índice de tablas

Tabla 1. Resumen las ventajas y retos más frecuentes asociados a las SBN.	11
--	----



Bibliografía

**Nuevas oportunidades para la
gestión sostenible del agua**



**FUNDACIÓN
RENOVABLES**

Bibliografía

Andreas N. Angelakis, & Joan B. Rose. (2014). *Evolution of Sanitation and Wastewater Technologies through the Centuries (Vol. 13)*. IWA.

AQUAE Fundación. (2025, October 30). El Parque La Marjal: una infraestructura pionera en España. <https://Www.Fundacionaquae.Org/Parque-Inundable-La-Marjal/>.

AQUEDUCT. (2025). Atlas de Riesgos Hídricos. <https://www.wri.org/applications/aqueduct/water-risk-atlas/#/?advanced=false&basemap=hydro&indicator=1b4f2592-09fd-4ac4-afcd-5a0a9a63617b&lat=38.676933444637925&lng=-3.8891601562500004&mapMode=view&month=1&opacity=0.5&ponderation=DEF&predefined=false&proj>.

Arch Daily. (2021). Estación Intermodal, Cúpula y Parque de Felipe VI / Ábalos + Sentkiewicz arquitectos. <https://Www.Archdaily.Cl/Cl/996836/Estacion-Intermodal-Cupula-y-Parque-de-Felipe-vi-Abalos-plus-Sentkiewicz-Arquitectos>.

Arévalo-Durazno, M. B., García Zumalacarregui, J. A., Ho, L., Narváez, A., & Alvarado, A. (2024). *Septage treatment using the First Stage of French Vertical Flow Constructed Wetlands: From the beginning to the closure of the system*. *Ecological Engineering*, 206, 107329. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2024.107329>.

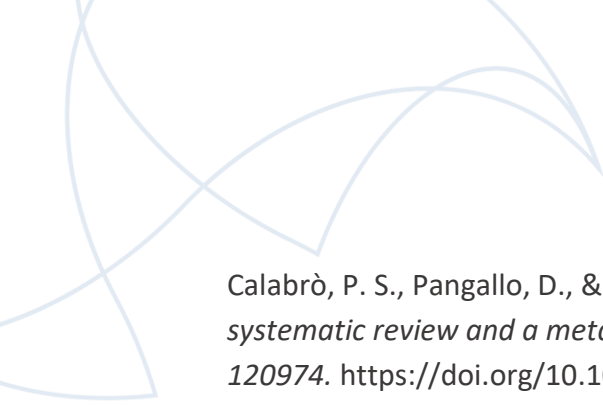
Basset, C., Abou Najm, M., Ghezzehei, T., Hao, X., & Daccache, A. (2023). *How does soil structure affect water infiltration? A meta-data systematic review*. *Soil and Tillage Research*, 226, 105577. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2022.105577>.

Bishopwater. (n.d.). Improving year-round nutrient removal to extend the life of a wastewater lagoon. Bishopwater.

Borràs, J. G., Lerma, C., Mas, Á., Vercher, J., & Gil, E. (2022). *Energy Efficiency Evaluation of Green Roofs as an Intervention Strategy in Residential Buildings in the Field of Spanish Climate*. *Buildings 2022, Vol. 12, Page 959, 12(7)*, 959. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS12070959>.

Bronstert, A., Niehoff, D., & Schiffler, G. R. (2023). *Modelling infiltration and infiltration excess: The importance of fast and local processes*. *Hydrological Processes*, 37(4), e14875. <https://doi.org/10.1002/HYP.14875;CTYPE:STRING:JOURNAL>.





Calabrò, P. S., Pangallo, D., & Zema, D. A. (2024). *Wastewater treatment in lagoons: A systematic review and a meta-analysis*. *Journal of Environmental Management*, 359, 120974. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2024.120974>.

Carleton, J. N., & Montas, H. J. (2010). *An analysis of performance models for free water surface wetlands*. *Water Research*, 44(12), 3595–3606. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2010.04.008>.

CITEC. (2015). Seguimiento y control del funcionamiento de la EDAR de Dormeá (Boimorto).

Coca Cola. (2024, December 13). El plan de Coca Cola para cuidar y conservar el agua. <https://www.Coca-Cola.Com/Es/Es/Sustainability/Plan-Conservacion-Agua>.

Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C., & Maginnis, S. (2016). *Nature-Based Solutions to Address Global Societal Challenges*. *International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN)*.

Comunidad de Madrid. (2018). Finalizan las obras de renaturalización en un tramo de 1,3 kilómetros del Manzanares - Ayuntamiento de Madrid. https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Finalizan-las-obras-de-renaturalizacion-en-un-tramo-de-1-3-kilometros-del-Manzanares/?vgnnextchannel=a12149fa40ec9410VgnVCM100000171f5a0aRCRD&vgnextoid=bd9ddccf6f763610VgnVCM1000001d4a900aRCRD&utm_source=chatgpt.com.

Congress for the new urbanism. (2012). *Madrid | Manzanares River Banks*. *Madrid | Manzanares River Banks*. <https://www.cnu.org/highways-boulevards/model-cities/madrid>.

CSIC. (2024). El IGME alerta del preocupante estado del 44 % de los acuíferos de España. <https://www.csic.es/es/actualidad-del-csic/el-igme-alerta-del-preocupante-estado-del-44-de-los-acuiferos-de-espana>.

Cui, S., Xiao, H., Miao, D., & Yang, W. (2023). *Metal uptake and translocation by Chinese brake fern (Pteris vittata) and diversity of rhizosphere microbial communities under single and combined arsenic and cadmium stress*. *Environmental Science and Pollution Research* 2023 30:36, 30(36), 85198–85209. <https://doi.org/10.1007/S11356-023-28448-2>.



Das, A., & Mukherjee, D. (2023, September 30). *Unsung Guardians: The Vital Wetlands of Kolkata*. *Roundglass Sustain*.

Duan, R., & Fedler, C. B. (2009). *Field study of water mass balance in a wastewater land application system*. *Irrigation Science*, 27(5), 409–416.
<https://doi.org/10.1007/S00271-009-0156-1/METRICS>.

EIT. (2025). *EIT Water. The Call for Proposals for EIT Water Is Now Closed! The Winning Consortia Leading EIT Water Has Been Designated*. <https://www.eit.europa.eu/our-activities/call-for-eit-communities/eit-water>.

El Independiente. (2019, August 25). Así funciona el parque inundable que evitó daños en el día más lluvioso en 160 años.
<https://www.ElIndependiente.Com/Futuro/2019/08/25/Asi-Funciona-El-Parque-Inundable-Que-Evito-Danos-En-El-Dia-Mas-Lluvioso-En-160-Anos/>.

Esfandiar, N., Suri, R., & McKenzie, E. R. (2024). *Evaluation of sorbent amendments used with stormwater management practices to remove contaminants: Impacts of rainfall intensity and antecedent dry periods*. *Science of The Total Environment*, 906, 167766. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.167766>.

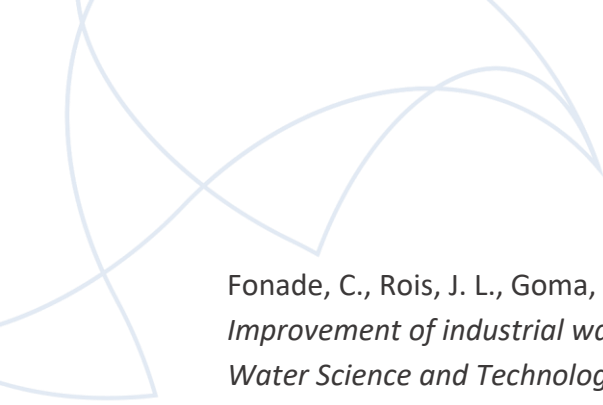
Comisión Europea. (2025). Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones: Estrategia europea de resiliencia hídrica (COM 2025 280 final; CELEX 52025DC0280).

European Economic & Social Committee. (2023). Declaración por un Pacto Azul Europeo. <https://doi.org/10.2864/367012>

European Environment Agency. (2021). *Nature-based solutions in Europe: Policy, knowledge and practice for climate change adaptation and disaster risk reduction (Number 01)*. <https://doi.org/10.2800/919315>.

European Parliamentary Research Service. (2025). *The future of water availability and use in the EU. A foresight study and policy options to address water scarcity*. <https://doi.org/10.2861/6213761>.

Expreso. (2025, July 15). Río Machángara: municipio de Quito acepta 14 medidas para su recuperación. <https://www.expreso.ec/quito/rio-machangara-municipio-quito-acepta-14-medidas-recuperacion-249942.html>.



Fonade, C., Rois, J. L., Goma, G., Doubrovine, N., Bermejo, M., & Grasa, J. P. (2000). *Improvement of industrial wastewater treatment by aerated lagoon: case studies. Water Science and Technology, 42(5–6), 193–200.*
<https://doi.org/10.2166/WST.2000.0514>.

Fundación Renovables. (2025). Mejora de la resiliencia de la industria frente al estrés hídrico.

García, J., Aguirre, P., Barragán, J., Mujeriego, R., Matamoros, V., & Bayona, J. M. (2005). *Effect of key design parameters on the efficiency of horizontal subsurface flow constructed wetlands. Ecological Engineering, 25(4), 405–418.*
<https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2005.06.010>.

Ghermandi, A., Bixio, D., & Thoeye, C. (2007). *The role of free water surface constructed wetlands as polishing step in municipal wastewater reclamation and reuse. Science of The Total Environment, 380(1–3), 247–258.*
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2006.12.038>.

Green Roof Organisation. (2026). <https://Greenrooforganisation.Org/Downloads/>.

Heineken. (2024). AVANCES EN SOSTENIBILIDAD 2023 EN CIFRAS. Heineken.

Hena Casas, J. D., Fernández Escalante, E., Calero Gil, R., & Ayuga, F. (2022). *Managed Aquifer Recharge as a Low-Regret Measure for Climate Change Adaptation: Insights from Los Arenales, Spain. Water 2022, Vol. 14, Page 3703, 14(22), 3703.*
<https://doi.org/10.3390/W14223703>.

Hinshaw, S., & Wohl, E. (2023). *Carbon sequestration potential of process-based river restoration. River Research and Applications, 39(9), 1812–1827.*
<https://doi.org/10.1002/RRA.4183;JOURNAL:JOURNAL:10991646;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER>.

Horizonte Europa. (2025). Apertura Convocatoria KIC Water. Apertura Convocatoria KIC Water. <https://www.horizonteeuropa.es/apertura-convocatoria-kic-water>.

ICE Por una Europa resiliente e inteligente en su gestión del agua, ECI(2024)000010 (2024).





IWA. (2025, May 19). *IWA Launches New Cluster on Nature-Based Solutions for Climate-Resilient Water and Sanitation Management*. <https://www.iwa-network.org/news/iwa-launches-new-cluster-on-nature-based-solutions-for-climate-resilient-water-and-sanitation-management>.

Jácome, J. A., Molina, J., Suárez, J., Mosqueira, G., & Torres, D. (2016). *Performance of constructed wetland applied for domestic wastewater treatment: Case study at Boimorto (Galicia, Spain)*. *Ecological Engineering*, 95, 324–329. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2016.06.049>.

Jódar, J., Martos-Rosillo, S., Custodio, E., Mateos, L., Cabello, J., Casas, J., Salinas-Bonillo, M. J., Martín-Civantos, J. M., González-Ramón, A., Zakaluk, T., Herrera-Lameli, C., Urrutia, J., & Lambán, L. J. (2022). *The Recharge Channels of the Sierra Nevada Range (Spain) and the Peruvian Andes as Ancient Nature-Based Solutions for the Ecological Transition*. *Water* 2022, Vol. 14, Page 3130, 14(19), 3130. <https://doi.org/10.3390/W14193130>.

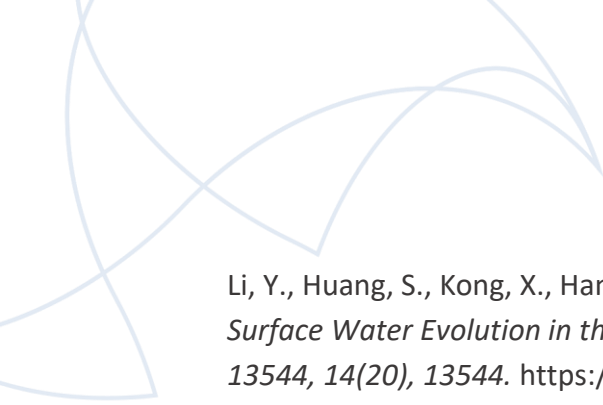
Jódar, J., Zakaluk, T., González-Ramón, A., Ruiz-Constán, A., Marín-Lechado, C. M., Martín-Civantos, J. M., Custodio, E., Urrutia, J., Herrera, C., Lambán, L. J., Durán, J. J., & Martos-Rosillo, S. (2022). *Artificial recharge by means of careo channels versus natural aquifer recharge in a semi-arid, high-mountain watershed (Sierra Nevada, Spain)*. *Science of The Total Environment*, 825, 153937. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.153937>.

Corte Nacional de Justicia. (2024). Juicio No. 17250-2024-00087. Quito, Ecuador.

Kafle, A., Timilsina, A., Gautam, A., Adhikari, K., Bhattarai, A., & Aryal, N. (2022). *Phytoremediation: Mechanisms, plant selection and enhancement by natural and synthetic agents*. *Environmental Advances*, 8, 100203. <https://doi.org/10.1016/J.ENVADV.2022.100203>.

Kandasamy, S., Narayanan, M., Raja, R., Devarayan, K., & Kavitha, R. (2023). *The current state of algae in wastewater treatment and energy conversion: a critical review*. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 33, 100469. <https://doi.org/10.1016/J.COESH.2023.100469>.

Lgem. (2025, December 8). *Commercial microalgae production: scaling from benchtop to factory*. *Commercial Microalgae Production: Scaling from Benchtop to Factory*.



Li, Y., Huang, S., Kong, X., Han, M., Wang, M., & Hui, H. (2022). *Ecological Effects of Surface Water Evolution in the Yellow River Delta*. *Sustainability* 2022, Vol. 14, Page 13544, 14(20), 13544. <https://doi.org/10.3390/SU142013544>.

Loria, N., & Lal, R. (2025). *Soil Health and Carbon Sequestration*. *Carbon Farming*, 41–77. https://doi.org/10.1007/978-3-032-00842-8_3.

Manjate, E. S., Lana, L. C., Moraes, D. C., Vasconcellos, G. R., Maciel, G. R., & Von Sperling, M. (2015). *First stage of the French vertical flow constructed wetland system: experiments with the reduction of surface area and number of units*. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 5(1), 50–55. <https://doi.org/10.2166/WASHDEV.2014.009>.

MARSOL. (2016, November 30). *Demonstrating Managed Aquifer Recharge as a Solution to Water Scarcity and Drought | FP7 | CORDIS | European Commission*. <https://cordis.europa.eu/project/id/619120/reporting>.

Mason, R. J., Johnson, M. F., Wohl, E., Russell, C. E., Olden, J. D., Polvi, L. E., Rice, S. P., Hemsworth, M. J., Sponseller, R. A., & Thorne, C. R. (2025). *Rebalancing River Lateral Connectivity: An Interdisciplinary Focus for Research and Management*. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 12(1), e1766. <https://doi.org/10.1002/WAT2.1766;ISSUE:ISSUE:DOI>.

MITECO. (2019). GUÍAS DE ADAPTACIÓN AL RIESGO DE INUNDACIÓN: SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE.

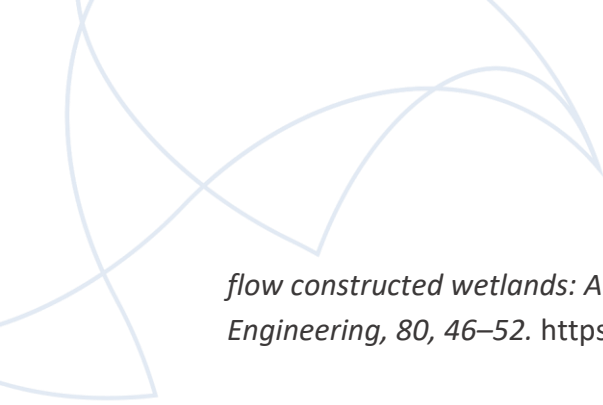
MITECO. (2021). Estrategia Nacional de Infraestructura Verde y de la Conectividad y Restauración Ecológicas. Gobierno de España.

MITECO. (2025). Sistema de Información de Redes de seguimiento del estado e información hidrológica. <https://sig.miteco.gob.es/redes-seguimiento/>.

Nano Gas Environmental. (2024, March 19). *Sewage Lagoon Sludge Treatment with Nanobubbles: 5 Things to Know*. *Sewage Lagoon Sludge Treatment with Nanobubbles: 5 Things to Know*.

Paing, J., Guilbert, A., Gagnon, V., & Chazarenc, F. (2015). *Effect of climate, wastewater composition, loading rates, system age and design on performances of French vertical*





flow constructed wetlands: A survey based on 169 full scale systems. Ecological Engineering, 80, 46–52. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2014.10.029>.

Pan, J., Zhang, H., Li, W., & Ke, F. (2012). *Full-Scale Experiment on Domestic Wastewater Treatment by Combining Artificial Aeration Vertical- and Horizontal-Flow Constructed Wetlands System. Water, Air, & Soil Pollution 2012 223:9, 223(9), 5673–5683. <https://doi.org/10.1007/S11270-012-1306-2>.*

Perini, K. (2017). *Madrid Río, Spain – Strategies and Techniques. Urban Sustainability and River Restoration, 117–126. <https://doi.org/10.1002/9781119245025.CH11>.*

Pradhan, S., Al-Ghamdi, S. G., & Mackey, H. R. (2019). *Greywater recycling in buildings using living walls and green roofs: A review of the applicability and challenges. Science of The Total Environment, 652, 330–344. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.10.226>.*

Prodanovic, V., Hatt, B., McCarthy, D., Zhang, K., & Deletic, A. (2017). *Green walls for greywater reuse: Understanding the role of media on pollutant removal. Ecological Engineering, 102, 625–635. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2017.02.045>.*

Pucher, B., & Langergraber, G. (2019). *Influence of design parameters on the treatment performance of VF wetlands - a simulation study. Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 80(2), 265–273. <https://doi.org/10.2166/WST.2019.268>.*

Quito Informa. (2025, October 22). Quito avanza en la recuperación ambiental del Machángara. <https://www.quitoinforma.gob.ec/2025/10/22/quito-avanza-en-la-recuperacion-ambiental-del-machangara/>.

RAMSAR. (2022, August 19). *East Calcutta Wetlands. Ramsar Sites Information Service.*

Roggeri, H. (1995). *Tropical Freshwater Wetlands. Tropical Freshwater Wetlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-8398-5>.*

Romero, J. (2022). CUBIERTAS VERDES ADECUADAS PARA EL ÁREA MEDITERRÁNEA.

Salas, J. J. (2018, July 30). Tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales: el Sistema Francés (I). IAGUA.



Shangwu, S., & Ruixue, Z. (2023, May 23). *Yellow River Delta protection drive stepped up* | *The Independent*. <https://www.independent.co.uk/asia/china/china-daily/yellow-river-delta-environment-wetlands-birds-b2344731.html>.

Siegrist, R. L. (2017). *Treatment Using Subsurface Soil Infiltration. Decentralized Water Reclamation Engineering*, 547–639. https://doi.org/10.1007/978-3-319-40472-1_11.

Stefanakis, A., Akrotos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2014). *Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment. Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-Engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment*, 1–378. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-01288-4>.

Taufik, M., Setiawan, B. I., & Van Lanen, H. A. J. (2018). *Increased fire hazard in human-modified wetlands in Southeast Asia. Ambio 2018 48:4, 48(4), 363–373.* <https://doi.org/10.1007/S13280-018-1082-3>.

The Nature Conservancy. (2021). Soluciones Basadas en la Naturaleza para la gestión del agua en España.

World Bank. (2008). Biodiversity, climate change, and adaptation: Nature-based solutions from the World Bank portfolio (Report No. 46726). Washington, DC: The World Bank.

Thomaidi, V., Petousi, I., Kotsia, D., Kalogerakis, N., & Fountoulakis, M. S. (2022). *Use of green roofs for greywater treatment: Role of substrate, depth, plants, and recirculation. Science of The Total Environment, 807, 151004.* <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.151004>.

TRAGSA. (2015). *La gestión integral del agua de lluvia en entornos humanizados.*

IUCN (2000)– *The World Conservation Union. Ecosystem management. Gland, Suiza: IUCN.*

IUCN. (2025). Nature-based Solutions Thematic Group. Nature-Based Solutions Thematic Group. <https://iucn.org/our-union/commissions/commissions-ecosystem-management/our-work/our-work/nature-based-solutions-thematic-group>.

Vassalle, L., Sunyer-Caldú, A., Díaz-Cruz, M. S., Arashiro, L. T., Ferrer, I., Garfí, M., & García-Galán, M. J. (2020). *Behavior of UV Filters, UV Blockers and Pharmaceuticals in*

High Rate Algal Ponds Treating Urban Wastewater. Water 2020, Vol. 12, Page 2658, 12(10), 2658. <https://doi.org/10.3390/W12102658>.

Veolia. (2026). La Marjal, primer parque urbano inundable de España. <https://Www.Veolia.Es/Casos-Exito/Marjal-Primer-Parque-Urbano-Inundable-Espana>.

VESI Environmental. (2021, July 1). ICW at Lixnaw, Co. Kerry. ICW at Lixnaw, Co. Kerry.

Von Sperling, M. (2007). *Waste Stabilisation Ponds. Water Intelligence Online, 6(0), 9781780402109–9781780402109.* <https://doi.org/10.2166/9781780402109>.

Vymazal, J., & Kröpfelová, L. (2008). *Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow. Environmental Pollution, 14.* <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8580-2>.

Wang, M.-H. S., & Wang, L. K. (2025). *Waste Stabilization Pond Fundamentals and Innovations. Industrial Water and Waste Treatment, 231–272.* <https://doi.org/10.1201/9781003532354-7/WASTE-STABILIZATION-POND-FUNDAMENTALS-INNOVATIONS-MU-HAO-SUNG-WANG-LAWRENCE-WANG>.


Wang, X., Li, J., Li, L., Guo, Y., Guo, B., & Zhao, C. (2025). *Spatiotemporal Variations in Soil Organic Carbon and Microbial Drivers in the Yellow River Delta Wetland, China. Sustainability (Switzerland), 17(11), 5188.* <https://doi.org/10.3390/SU17115188/S1>.

Young, P., Taylor, M., & Fallowfield, H. J. (2017). *Mini-review: high rate algal ponds, flexible systems for sustainable wastewater treatment. World Journal of Microbiology and Biotechnology 2017 33:6, 33(6), 117-.* <https://doi.org/10.1007/S11274-017-2282-X>.

Zhang, X., Wu, M., Zhang, X., Wu, X., & Liu, Z. (2025). *Sequential bioremediation of weathered petroleum-contaminated soil: A comparative study of biochar-immobilized microbes combined with Festuca arundinacea and Kalanchoe blossfeldiana. Journal of Environmental Chemical Engineering, 13(5), 117558.* <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2025.117558>.

Zhang, Y., Zhang, X., Fang, W., Cai, Y., Zhang, G., Liang, J., Chang, J., Chen, L., Wang, H., Zhang, P., Wang, Q., & Zhang, Y. (2025). *Carbon sequestration potential of wetlands and regulating strategies response to climate change. Environmental Research, 269, 120890.* <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2025.120890>.





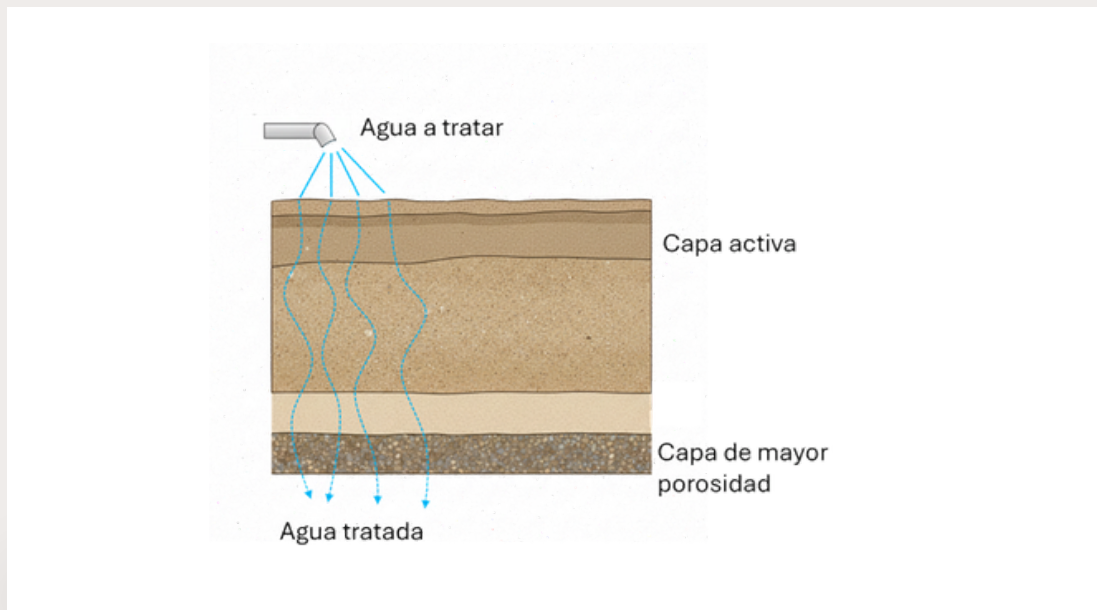
Zhao, Q., Bai, J., Huang, L., Gu, B., Lu, Q., & Gao, Z. (2016). *A review of methodologies and success indicators for coastal wetland restoration*. *Ecological Indicators*, 60, 442–452. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2015.07.003>.

Anexos

**Nuevas oportunidades para la
gestión sostenible del agua**



**FUNDACIÓN
RENOVABLES**



LECHOS DE INFILTRACIÓN RÁPIDA

La infiltración rápida es una técnica de tratamiento que aprovecha los procesos físico-químicos que tienen lugar al percolar el agua residual a través de un lecho poroso. El agua es sometida a procesos de adsorción, precipitación, filtración e incluso procesos de intercambio iónico.

Consideraciones de diseño

- Permeabilidad superior a 1,5 cm/h.
- Al menos 3,0-4,0 m de lecho.
- 150 m² por m³ y día.
- Sensible a variaciones de caudales.
- Necesario aplicar un lecho activo para retener nutrientes.

Mantenimiento y operación

- Renovación de las capas del lecho en función de su saturación para evitar compactación.
- Eliminación de material depositado.
- Reducción de costes de mantenimiento con desbaste previo.

Rendimientos

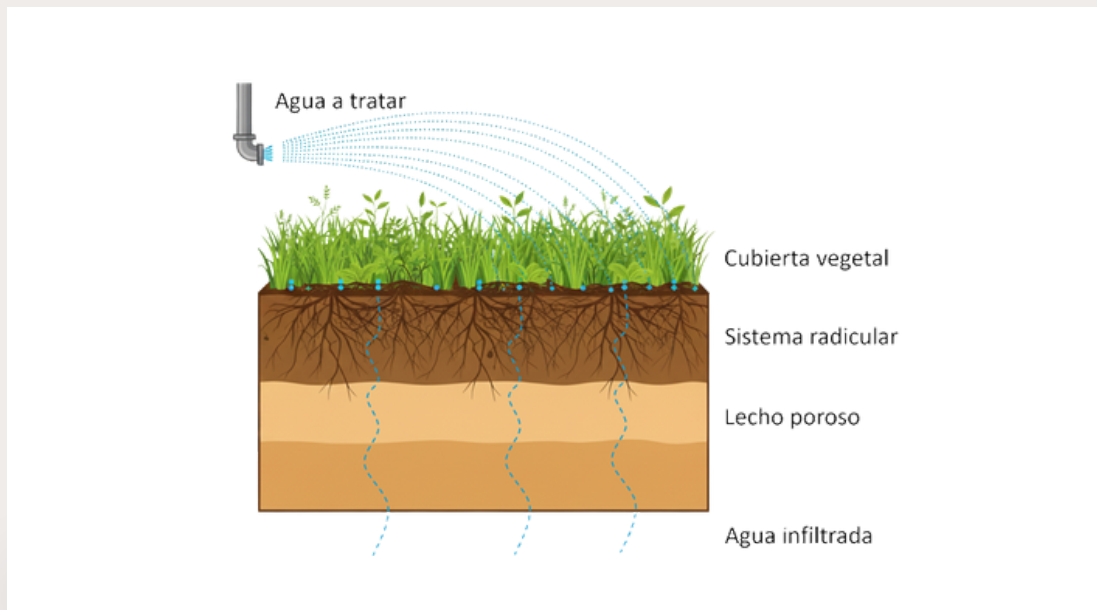
- Hasta 80% DQO.
- Sólidos suspendidos: 95-99%.
- Nitrógeno total: 25-90%.
- Fósforo total: 0-99%.

Beneficios

- Obtención de agua regenerada a bajo costo.
- Recuperación de acuíferos y nivel freático.

Ámbito aplicación

- Aguas grises.
- Agua residual urbana e industrial con tratamiento primario o secundario.
- ▲ Los arenales (Castilla y León).



LECHOS DE INFILTRACIÓN LENTA

En los lechos de infiltración lenta, el agua residual es aplicada sobre un lecho poroso con cubierta vegetal. Se combinan los procesos físico-químicos propios del lecho junto con la actividad biológica del suelo (sistema radicular, bacterias y hongos, principalmente).

Consideraciones de diseño

- Permeabilidad superior entre 1,5 y 5,0 mm/h.
- Al menos 1,0 m (al menos que permita el desarrollo del sistema radicular).
- Superior a 200 m² por m³ y día.
- Sensible a variaciones de caudales.
- Diseño enfocado a maximizar la velocidad de tratamiento o buscando fomentar crecimiento vegetal.
- Selección de vegetación autóctona.

Mantenimiento y operación

- Necesario eliminar partículas finas previamente.
- Laboreo de la tierra y mantenimiento de la cubierta vegetal.



Rendimientos

- Hasta 99% DQO.
- Sólidos suspendidos: 95-99%.
- Nitrógeno total: 80-99%.
- Fósforo total: 80-99%.



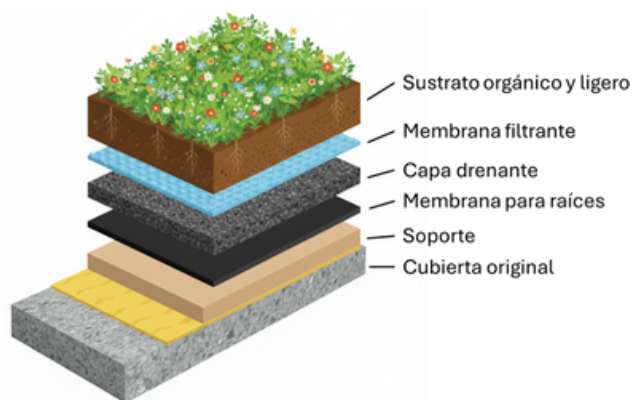
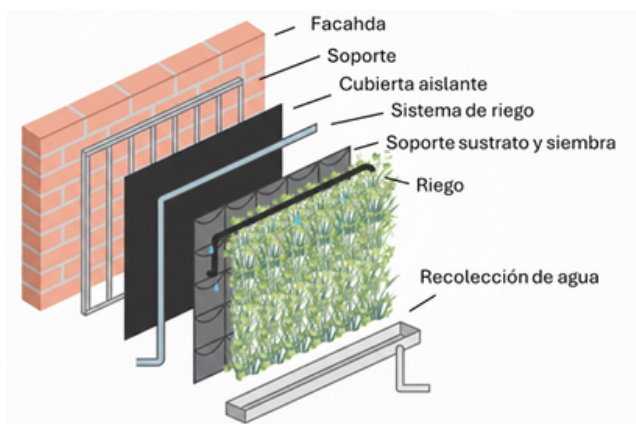
Beneficios

- Obtención de agua regenerada a bajo costo.
- Recuperación de acuíferos y nivel freático.
- Posibilidad de compatibilizar con cosechas.



Ámbito aplicación

- Aguas grises.
- Agua residual urbana e industrial con tratamiento primario o secundario.
- ▲ Sierra Nevada (Granada).



TECHOS Y MUROS VERDES

Soluciones aplicadas en entornos urbanos donde se busca aprovechar las infraestructuras existentes para la plantación de cubierta vegetal. El objetivo de esta solución es obtener los beneficios ambientales de las cubiertas vegetales en entornos altamente antropizados.

Consideraciones de diseño

- Selección de vegetación en función de la orientación de la fachada.
- Sustrato ligero para evitar sobrecargas.
- Necesario cálculo el aporte de carga a la estructura.
- Espesores entre 5 y 50 cm.
- Implantación de capas aislantes y drenantes.

Mantenimiento y operación

- Control del exceso de raíces.
- Asegurar que las plántulas se injertan correctamente.
- Comprobar que los nutrientes aportados se encuentran balanceados.
- Eliminar material depositado por lluvias o por otros sólidos finos.



Rendimientos

En función de la vegetación y sustrato, la calidad general del agua puede verse mejorada en un 10-99%.



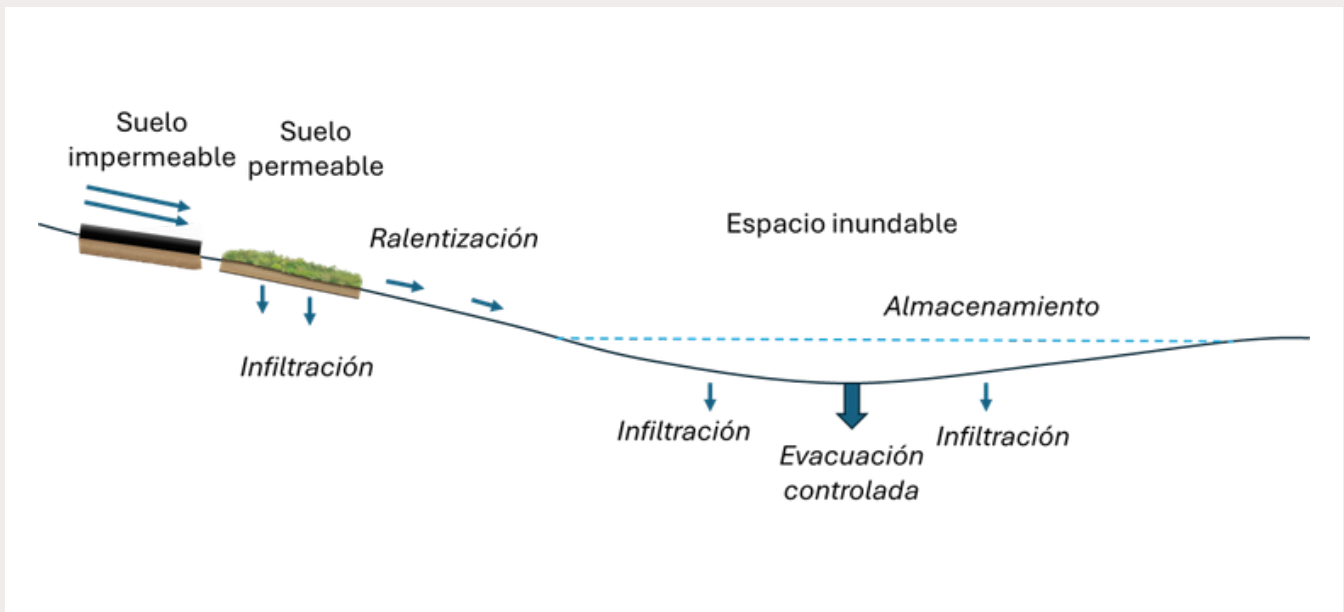
Beneficios

- Regeneración de agua para usos menos restrictivos (riego, fuentes...).
- Regulación de temperatura del edificio
- Incremento de la biodiversidad.
- Valor paisajístico.



Ámbito aplicación

- Aguas grises.
- Agua de lluvia.
- ▲ Estación de autobuses de Logroño



SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLES

Soluciones orientadas a mejorar la permeabilidad de los entornos urbanos. Se trata de un conjunto de acciones que disminuyen la velocidad del agua en las ciudades para almacenarla en entornos controlados y posteriormente evacuarla, minimizando los riesgos de inundación.

Consideraciones de diseño

- Para pavimentos permeables se debe considerar el uso (zona peatonal, densidad de tráfico de vehículos...).
- En parques u otras zonas inundables:
 - ✓ Pendiente de 1-2% hacia zona de desagüe.
 - ✓ Implantar varios desagües e incluso un sistema de vaciado de emergencia.
 - ✓ La morfología del vaso dependerá del clima de la zona.
 - ✓ Considerar si habrá zona de agua permanente o no.

Mantenimiento y operación

- Limpieza periódica de basura y otros sólidos.
- Mantenimiento de la vegetación (si existe).
- Revisión periódica de elementos de seguridad y válvulas de desagüe.
- Si hay agua permanente, asegurar la calidad de la masa de agua.



Rendimientos

No aplica



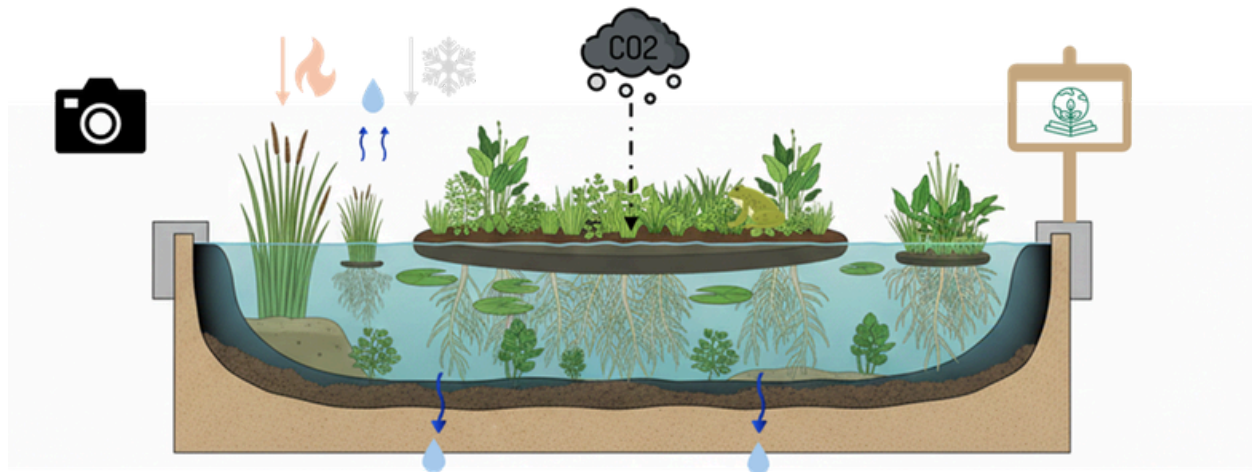
Beneficios

- Reducción de riesgos de inundación.
- Zona de recreo.
- Incremento de la biodiversidad.
- Reduce el efecto de isla de calor.
- Valor paisajístico.



Ámbito aplicación

- Entornos urbanos
- ▲ Parque La Marjal (Alicante)



RESTAURACIÓN DE ECOSISTEMAS NATURALES

Intervención en un ecosistema natural para revertir el impacto ambiental provocado por las actividades humanas. Tras su restitución, se busca maximizar los beneficios ambientales y sociales de estos entornos con la mínima intervención.

Consideraciones de diseño

- Control de especies invasoras y de la densidad de la cobertura vegetal.
- Saneamiento del lecho si este se encuentra contaminado o saturado en nutrientes.
- Mejorar las conexiones horizontales entre zonas para mejorar la recarga de humedales o favorecer la inundación controlada de las riberas.

Mantenimiento y operación

- Revisión de los lechos para mantener una buena calidad del ecosistema.
- Control de la calidad del agua.
- Control del desarrollo de las especies vegetales.
- Inspección y seguimiento de los vertidos autorizados a estos entornos.



Rendimientos

No aplica.



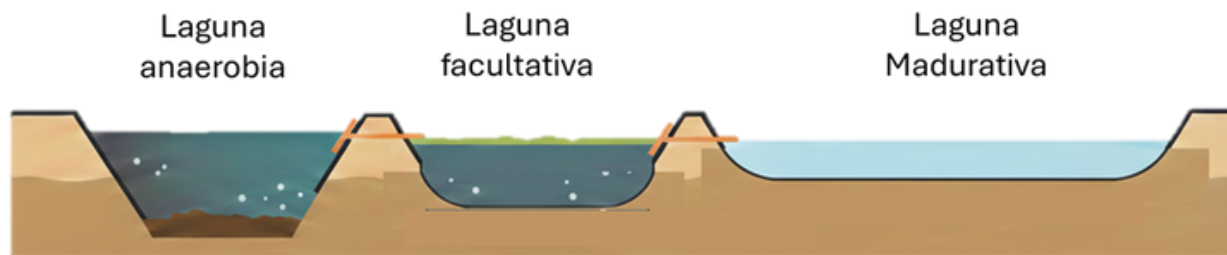
Beneficios

- Reducción de riesgos de inundación.
- Zona de recreo.
- Incremento de la biodiversidad.
- Valor paisajístico.
- Mejora del clima local.
- Captura de carbono.
- Mejora de los acuíferos.
- Espacios para educación ambiental.



Ámbito aplicación

- Administración pública.
- Empresas con planes de restitución del agua.
- Grupos de investigación.
- ▲ Madrid Río (Madrid).



SISTEMAS DE LAGUNAJE

Conjunto de soluciones combinadas o independientes que pretenden fomentar de manera pasiva diferentes procesos naturales, como la decantación, la degradación bacteriana, la fotosíntesis o la desinfección por acción solar.

Consideraciones de diseño

- Dependiente del clima.
- Altos requisitos de superficie.

Laguna anaerobia

- Profundidad de, al menos, 3 metros.
- TRH de entre 1 y 2 días.

Laguna facultativa

- Profundidad de 1 a 2 metros.
- TRH superior a 4 días.
- Se puede mejorar el tratamiento con aireadores.

Laguna madurativa

- Profundidad de 0,5 a 1,0 metros.
- TRH elevado, puede ser superior a 20 días.
- A veces se sustituye por UV para ahorrar espacio.

Mantenimiento y operación

- Retirada de sólidos y fango.
- Control de la carga orgánica para evitar propagación de olores.
- Control de las algas generadas.



Rendimientos

Laguna anaerobia

- 60-75% Sólidos suspendidos.
- 60-75% DQO.

Laguna facultativa

- 40-80% DQO.
- Hasta 90% nitrógeno.
- Hasta 50% fósforo.

Laguna madurativa

- Hasta 99,9% de coliformes totales.



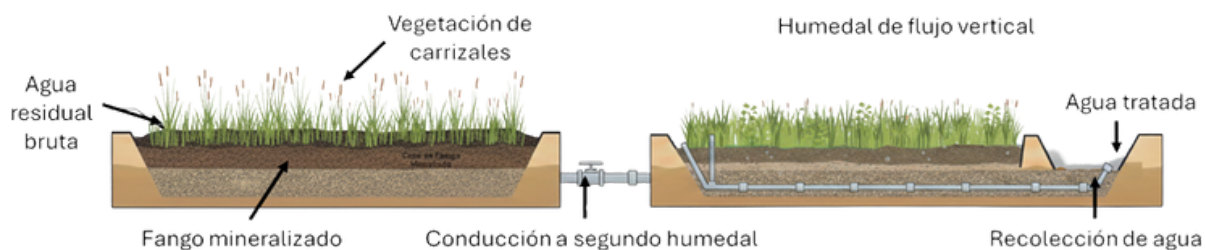
Beneficios

- Tratamiento de aguas a bajo coste.
- Incremento biodiversidad.



Ámbito aplicación

- Aguas grises.
- Aguas urbanas.
- Aguas industriales.
- ▲ Planta de celulosas, en Tartas (Francia).



HUMEDALES VERTICALES

Recreación de un humedal natural donde el agua fluye desde la superficie (cubierta vegetal) hacia la zona radicular. Combina los mecanismos de depuración de la vegetación emergente con la actividad microbiológica de la zona radicular y los procesos físico-químicos del sustrato.

Consideraciones de diseño

- Dependiente del clima.
- Selección de especies autóctonas.
- Los rendimientos mejoran con un desbaste previo.

Humedal francés

- Suelo de alta porosidad con una granulometría superior a 5 mm.
- Se recomiendan 3 humedales para alternar etapas de carga y reposo.

Humedal vertical

- Profundidad cercana a 1 metro.
- Gradiente de granulometría: fina en la superficie y grava en la base.
- Posible empleo de material reactivo para eliminar nutrientes.

Mantenimiento y operación

- Control periódico de la vegetación.
- Renovación del lecho reactivo.
- Retirada del fango mineralizado cada 8 años en adelante o, si no hay humedal francés, retirada frecuente de sólidos depositados.



Rendimientos

- Retención de más del 90% de sólidos totales con humedal francés.
- DQO: 90%.
- Amonio: 90%.
- Nitrógeno total: 50%.
- Fósforo \approx 100% con material reactivo.



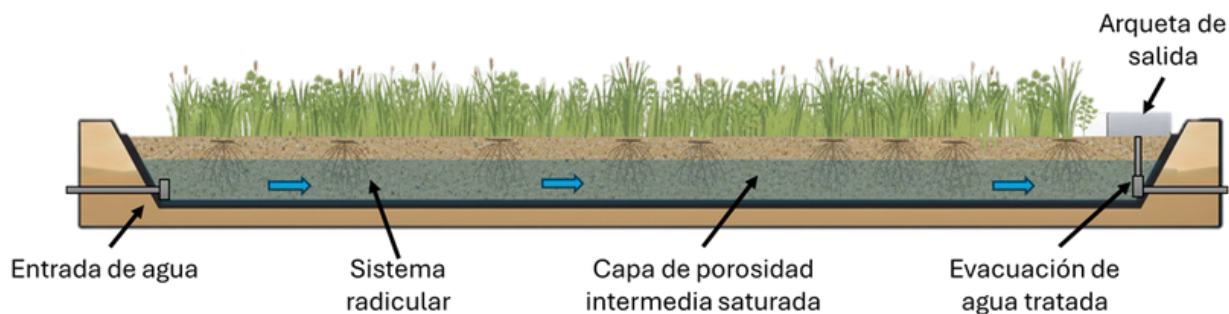
Beneficios

- Incremento de la biodiversidad.
- Reduce el efecto de isla de calor.
- Valor paisajístico.
- Tratamiento de aguas a bajo coste.



Ámbito aplicación

- Agua residuales urbanas e industriales con tratamiento primario.
- Aguas grises.



HUMEDALES HORIZONTALES

Recreación de un humedal natural donde el agua fluye únicamente por la zona radicular. El lecho se encuentra completamente saturado en agua y principalmente tienen lugar procesos anóxicos, junto con los procesos físico-químicos propios del lecho.

Consideraciones de diseño

- Dependiente del clima.
- Selección de especies autóctonas.
- Granulometría del suelo intermedia para favorecer el flujo del agua.
- Se recomienda limitar la carga de sólidos a 10 g de sólidos suspendidos por m² y día.
- Posible empleo de material reactivo para eliminar nutrientes.
- Posible empleo de aireadores para incrementar la eliminación de materia orgánica.

Mantenimiento y operación

- Control periódico de la vegetación.
- Renovación del lecho reactivo.
- Retirada de material depositado para evitar la propagación de olores.
- Mantenimiento de equipos de aireación por colmatación.



Rendimientos

- DQO: 60-80%.
- Amonio: 30-40%.
- Nitrógeno total: 30-50% (estos valores se pueden incrementar mediante un sistema de aireación).
- Retención de SST más del 75%.
- Fósforo ≈ 100% con material reactivo.



Beneficios

- Incremento de la biodiversidad.
- Reduce el efecto de isla de calor.
- Valor paisajístico.
- Tratamiento de aguas a bajo coste.



Ámbito aplicación

- Agua residuales urbanas e industriales con tratamiento primario o secundario.
- Aguas grises.



FUNDACIÓN
RENOVABLES

Santa Engracia 108, 5º Interior Izquierda
28003 Madrid

www.fundacionrenovables.org

