

CONAMA 2024

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

Aplicación de Soluciones basadas en la Naturaleza para la gestión sostenible del agua en la región Mediterránea

Proyecto NATMed



CONAMA 2024

APLICACIÓN DE SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DEL AGUA EN LA REGIÓN MEDITERRÁNEA

Autor Principal: Raquel Marijuan Cuevas (Fundación CARTIF)

Otros autores: Sandra Rodríguez Sufuentes (Fundación CARTIF), Bárbara Díez Rodríguez (Fundación CARTIF), Nuria Fernández Rico (Fundación CARTIF), , Silvia Gómez (Fundación CARTIF), Esther San José (Fundación CARTIF), Jorge Calvo (Fundación CARTIF), Jose Feroso (Fundación CARTIF), Isabel Martín García (AMAYA), María Pilar Flores Sáenz (AMAYA), Khalid Fahd Draissi (AMAYA), Guillermo Solís Sastre (AMAYA), Claudia Sánchez Escudero (SBNCLIMATE), Jesús Iglesias Saugar (SBNCLIMATE), Sara Peláez Sánchez (SBNCLIMATE), Natascha Wahlberg Macías (Social Climate), Carmen María Pérez Juan (Social Climate), Patricia Marín Poveda (Social Climate), Raúl Sánchez Francés (Fundación CARTIF).

CONAMA 2024

APLICACIÓN DE SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DEL AGUA EN LA REGIÓN MEDITERRÁNEA

ÍNDICE

1. Aplicación de Soluciones basadas en la Naturaleza para la gestión sostenible del agua en la región Mediterránea: proyecto NATMed	2
2. Resumen.....	2
2.1. Palabras clave	3
3. Introducción.....	4
4. Metodología.....	7
4.1. Caso de Estudio Carrión de los Céspedes (España)	7
4.2. Soluciones basadas en la Naturaleza implementadas en Carrión de los Céspedes	8
4.3. Metodología de evaluación	12
5. Resultados.....	15
5.1. Eliminación de nutrientes por los humedales.....	15
5.2. Calidad de agua en ecosistemas acuáticos	16
5.3. Temperatura del agua	18
5.4. Cálculo de evaporación/evapotranspiración	18
5.5. Contenido de materia orgánica del suelo	19
5.6. Parámetros de fertilidad del suelo	19
5.7. Diversidad de especies	20
5.8. KPI culturales	22
6. Discusión y Conclusiones	23
7. Disclaimer.....	24
8. Bibliografía	25

1. APLICACIÓN DE SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DEL AGUA EN LA REGIÓN MEDITERRÁNEA: PROYECTO NATMED

2. RESUMEN

La escasez de agua es un problema crítico en la región mediterránea, siendo la sobreexplotación de los recursos hídricos para la agricultura una de las principales presiones. Este modelo conlleva que las reservas naturales de agua ya no sean suficientes para satisfacer la creciente demanda y se incremente la pérdida de ecosistemas acuáticos. Para hacer frente a este desafío es esencial mejorar la gestión del ciclo del agua. Un enfoque integrado y la adopción de Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) adaptadas a la infraestructura existente puede conducir a un uso más sostenible y optimizado de los recursos hídricos. La implementación de SbN contribuye a la restauración de ecosistemas acuáticos naturales degradados, el mantenimiento de ecosistemas saludables y la provisión de Servicios Ecosistémicos relacionados con el agua y dependientes de ella. Además, aporta beneficios socioeconómicos como la mejora del conocimiento y percepción de la naturaleza y sus beneficios y la creación de empleos verdes. Por lo tanto, es fundamental aplicar SbN que contribuyan a aumentar la disponibilidad de recursos hídricos para la agricultura, aliviando la demanda de otros recursos hídricos convencionales de mayor calidad. En este contexto, uno de los principales retos a la hora de promover e impulsar el uso de SbN es la evaluación de su impacto bajo normas estandarizadas, que permitan comprender su efecto en la provisión de Servicios Ecosistémicos, en la eficiencia de las infraestructuras hídricas y la gestión del ciclo del agua.

En el proyecto NATMed, diseñamos y desarrollamos SbN para 1) reutilizar aguas residuales tratadas para la irrigación de cultivos, y 2) mejorar la capacidad de almacenamiento de las infraestructuras hidráulicas. Para lograr nuestros objetivos, hemos seguido tres estrategias diferentes pero complementarias. Por un lado, evaluamos posibles combinaciones de varios tipos de Humedales Artificiales para encontrar la más óptima con el fin de tratar aguas residuales que cumplan con el Reglamento de la Unión Europea (2020/741) con fines de riego. Por otro lado, hemos diseñado un prototipo de Jardines Flotantes para evitar la evaporación del agua y el crecimiento de microalgas y aumentar la capacidad de las infraestructuras de almacenamiento de agua. Finalmente, estudiamos el efecto de la tecnología de ultrasonidos en la calidad del agua tratada por los Humedales Artificiales y almacenada para su reutilización en la agricultura. A su vez, hemos desarrollado un marco de evaluación basado en indicadores ambientales, sociales y económicos. Este marco, que integra el Estándar Global para SbN de la UICN, e incluye estos aspectos, contribuye a evaluar las intervenciones desde la fase del diseño, buscando una mejora continua con el fin de alcanzar el máximo impacto en términos de biodiversidad, gobernanza, economía, etc. Para medir el impacto, hemos definido una línea base que muestra el estado actual del caso de estudio mediante la recopilación de datos y mediciones previas a la implementación de las soluciones. Esta línea base se comparará con la situación posterior a la implementación de SbN para conocer su impacto a nivel ambiental, social y económico.

Prevedemos que las SbN implementadas pueden promover y favorecer prácticas de gestión del agua más sostenibles, capaces de optimizar el funcionamiento de las infraestructuras de agua existentes, a la vez que contribuyen a alcanzar objetivos de conservación y gestión de la biodiversidad y adaptación al cambio climático.

2.1. Palabras clave

- Gestión del agua
- Soluciones basadas en la Naturaleza
- Humedales Artificiales
- Jardines Flotantes
- Ultrasonidos
- Servicios Ecosistémicos
- Reutilización de agua
- Marco de evaluación
- IUCN Global Standard for NbS / Estándar Global para SbN de la UICN

3. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso escaso en la región mediterránea, constituyendo únicamente el 3% de las reservas hídricas mundiales (1). Esta situación se ve agravada por varias amenazas, como el aumento de la huella hídrica, el crecimiento demográfico, la contaminación y el impacto del cambio climático, que comprometen la seguridad hídrica de la región. El consumo de agua en regiones de clima cálido es notablemente elevado debido a las altas tasas de evaporación y la gran demanda de riego agrícola (2). En este contexto, las actividades agrícolas (las cuales se han visto exacerbadas por el crecimiento poblacional previamente mencionado) representan una de las principales amenazas para la disponibilidad de los recursos hídricos en esta región, ya que su sobreexplotación ejerce una fuerte presión sobre los ecosistemas acuáticos, provocando la degradación del medio ambiente y la pérdida de ecosistema. Más del 80% del agua extraída en los países del sur y este del Mediterráneo se destina a la agricultura, lo que impide que las reservas naturales puedan satisfacer la creciente demanda, y a su vez provoca el deterioro de los ecosistemas acuáticos. Además, la escasez de agua se ve incrementada por los rápidos cambios en el clima, caracterizados por el aumento de las temperaturas y la creciente frecuencia de fenómenos extremos (tales como olas de calor, temperaturas extremas y lluvias torrenciales), lo cual genera una mayor variabilidad espacial y temporal en el ciclo global del agua (3). Esta variabilidad espacial se manifiesta en diferencias en la distribución y comportamiento del agua en distintas regiones del planeta, lo que se traduce en variaciones en la cantidad de precipitaciones o en la disponibilidad de agua en diferentes áreas geográficas. A su vez, la variabilidad temporal refleja los cambios en los patrones del agua a lo largo del tiempo, abarcando desde escalas estacionales y anuales hasta periodos de décadas. Ambos tipos de variabilidad son cada vez más pronunciados debido a la influencia del cambio climático (4).

Entre los riesgos más preocupantes como consecuencia de este problema, la sequía destaca como uno de los principales desafíos, ya que se prevé que empeore incluso con un aumento global de solo 1,5 °C, lo que podría generar intensidades sin precedentes en escenarios de mayor calentamiento (4). Estas condiciones más secas pueden resultar en una disminución considerable en la recarga de aguas subterráneas y en el contenido de agua del suelo durante los veranos en el sur de Europa y el norte de África. Esto afectaría gravemente a los ecosistemas terrestres, reduciendo el área de distribución de muchas especies, limitando el crecimiento de los árboles, al tiempo que incrementaría el riesgo de incendios forestales y la erosión del suelo. Asimismo, las zonas costeras se verían afectadas por riesgos como inundaciones, erosión y salinización, lo que se suma a la escasez de agua, la disminución de los rendimientos agrícolas y la degradación del suelo. Estos efectos, sumados a las olas de calor y la contaminación, también tendrían consecuencias negativas para la salud humana. Además, se anticipa una pérdida significativa de biodiversidad en los ecosistemas terrestres, marinos y de agua dulce (5). Todo esto también supondría una amenaza para el atractivo turístico de la región.

Por otro lado, el cambio climático no solo es un problema en cuanto a la disponibilidad del agua. Existen diversas evaluaciones sobre su impacto en la cuenca mediterránea, las cuales indican un calentamiento continuo de la atmósfera y los mares (afectando por ello también a los ecosistemas acuáticos). Estos factores sitúan a la región como un "punto caliente del cambio climático", donde numerosos sistemas naturales y sectores socioeconómicos son particularmente vulnerables.

CONAMA 2024

APLICACIÓN DE SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DEL AGUA EN LA REGIÓN MEDITERRÁNEA

El deterioro de la calidad del agua es otro desafío que se enfrenta en la región. La contaminación causada por productos químicos, que son arrastrados por la escorrentía agrícola, afecta negativamente a las fuentes de agua, comprometiendo su seguridad y salubridad. Además, el crecimiento de la población exige una mejora en el tratamiento de aguas residuales para hacer frente al creciente volumen de desechos.

Para abordar estos retos, se proponen varias líneas de acción. Por un lado, la mejora de la eficiencia del uso del agua, la reutilización de aguas residuales tratadas, y la gestión adecuada del ciclo del agua son algunas de las soluciones más efectivas (6). También se prioriza la mejora de la seguridad hídrica a través de la modernización de los sistemas de saneamiento y depuración, junto con la lucha contra la contaminación difusa y la gestión coordinada de los riesgos de inundaciones y sequías. La innovación tecnológica, la digitalización del ciclo del agua y el fortalecimiento de la gobernanza constituyen áreas clave de acción. Además, es esencial cumplir con la legislación europea y adaptar la planificación hídrica al cambio climático, lo cual aseguraría un enfoque integral a largo plazo.

En este contexto, la restauración, recuperación y protección de los ecosistemas naturales se presenta como un factor crucial para mejorar la disponibilidad de agua y garantizar una gestión hídrica eficaz y resiliente (7). Los ecosistemas naturales, entendidos como una comunidad de organismos que interactúa entre sí y con su entorno físico de manera equilibrada, desempeñan un papel fundamental en la regulación de diferentes aspectos del ciclo del agua al proporcionar Servicios Ecosistémicos (SE) que ayudan a regular, limpiar y suministrar agua (8–11). Especialmente los humedales naturales desempeñan un papel muy importante en los procesos hidrológicos, entre ellos la recarga y descarga de aguas subterráneas, la alteración del flujo de crecidas, la estabilización de sedimentos y la purificación del agua al eliminar nutrientes y contaminantes. Además, son fundamentales para mantener la disponibilidad de agua durante las sequías y sostener actividades económicas como la pesca, el ecoturismo y la agricultura (12–14).

Por ello, las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) han surgido como enfoques innovadores que aprovechan estos procesos naturales para restaurar ecosistemas o implementar sistemas con un funcionamiento similar. Estas soluciones ofrecen almacenamiento y purificación del agua, control de la erosión y moderación de eventos extremos, convirtiéndose en una estrategia clave para enfrentar los desafíos ambientales actuales y mejorar la gestión sostenible de los recursos hídricos (12). Para maximizar su efectividad y asegurar una correcta implementación, la monitorización y evaluación del impacto de las SbN son necesarias para proporcionar conocimientos imparciales sobre su rendimiento y promover e impulsar su uso a mayor escala, aunque una evaluación rigurosa y basada en normativas estandarizadas se presenta muchas veces como un reto (14). El desarrollo y uso de normativas estandarizadas permiten comprender con precisión los efectos de las SbN en varios aspectos clave como la provisión de Servicios Ecosistémicos, la eficiencia de las infraestructuras hídricas, y la gestión integral del ciclo del agua. Recientemente se han propuesto varios marcos para la evaluación de las SbN en diferentes contextos urbanos y medioambientales. Entre ellos, el manual “Evaluación del impacto de las soluciones basadas en la naturaleza” (5) proporciona un marco completo de evaluación del impacto de las SbN, proporcionando un conjunto de indicadores y metodologías para evaluar el impacto de las SbN en 12 ámbitos de retos sociales: resiliencia climática; Gestión del agua; Riesgos naturales y climáticos; Gestión de espacios verdes; Biodiversidad; Calidad del aire; Regeneración de lugares; Desarrollo de conocimientos y capacidades sociales para la

CONAMA 2024

APLICACIÓN DE SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DEL AGUA EN LA REGIÓN MEDITERRÁNEA

transformación urbana sostenible; Planificación y gobernanza participativas; Justicia social y cohesión social; Salud y bienestar; Nuevas oportunidades económicas y empleos verdes (15).

En el proyecto NATMed (financiado por el programa PRIMA) hemos diseñado y desarrollado SbN para la mejora de la gestión del ciclo del agua, en concreto en el ámbito agrícola. En esta comunicación, se presentan las principales estrategias que se han seguido en el Caso de Estudio 1, localizado en Carrión de los Céspedes (Sevilla, España), para hacer frente a los retos locales relacionados con la gestión del agua y el cambio climático mediante la implementación de SbN. También se presenta la aplicación de un marco de evaluación para medir el impacto de las SbN implementadas, partiendo de la situación de la línea base y de la aplicación del Estándar Global para SbN de la UICN.

4. METODOLOGÍA

En el Caso de Estudio Carrión de los Céspedes del proyecto NATMed, diseñamos y desarrollamos SbN para 1) utilizar aguas residuales tratadas para la irrigación de cultivos, y 2) mejorar la capacidad de almacenamiento de las infraestructuras hídricas. Para lograr nuestros objetivos, hemos seguido tres estrategias diferentes pero complementarias: evaluamos posibles combinaciones de varios tipos de Humedales Artificiales, e implementamos Jardines Flotantes y sistemas de ultrasonidos en tanques de almacenamiento de agua. Para medir el impacto de estas tres estrategias, hemos aplicado un marco de evaluación basado en la provisión de Servicios Ecosistémicos y en indicadores ambientales, sociales o económicos.

4.1. Caso de Estudio Carrión de los Céspedes (España)

Uno de los casos de estudio seleccionados para la implementación de las SbN en el proyecto NATMed, se localiza en el Centro Experimental de Nuevas Tecnologías del Agua (CENTA), en Carrión de los Céspedes, en Sevilla (Figura 1).

Este centro experimental se trata de un *Living Lab*, un espacio dedicado a la co-creación, experimentación y evaluación de productos innovadores en el ámbito del agua, tecnologías de tratamiento de aguas residuales y soluciones para la economía circular. Además, cumple la función de planta de tratamiento de aguas residuales para el municipio.

Los principales desafíos a los que se enfrenta la región respecto a la gestión del agua y la seguridad hídrica son los siguientes:

- Sequías estacionales.
- Escasez de agua.
- Calidad del agua almacenada.
- Contaminación del agua y escorrentías.
- Contaminación difusa de los acuíferos por fertilizantes. Existen dificultades en controlar la contaminación difusa por el exceso de fertilizantes y pesticidas, que afectan directamente a los acuíferos.
- Evaporación. Altas tasas de evaporación del agua almacenada debido al aumento de las temperaturas.
- Digitalización del agua. Baja eficiencia de los sistemas de distribución y riego de agua.
- Impactos del cambio climático. Disminución de la precipitación e incremento de la temperatura según los escenarios del cambio climático.



Figura 1. Centro Experimental de Nuevas Tecnologías del Agua (CENTA), Carrión de los Céspedes, Sevilla

Para hacer frente a estos retos, en el Caso de Estudio de Carrión de los Céspedes, se han establecido los siguientes objetivos:

1. Reutilizar aguas residuales tratadas para la irrigación de cultivos, transformándolas en una fuente de agua segura y sostenible para la agricultura. Esta estrategia no solo contribuye a la gestión eficiente del agua, sino que también ayuda a reducir la presión sobre las fuentes de agua naturales.
2. Mejorar la capacidad de almacenamiento de las infraestructuras hidráulicas: se pretende optimizar y ampliar la capacidad de almacenamiento de las infraestructuras existentes mediante la implementación de soluciones innovadoras. Esto incluye la utilización de técnicas naturales y tecnologías avanzadas para aumentar la eficiencia en la captura y retención de agua, garantizando un suministro más estable y resiliente frente a las variaciones climáticas.

4.2. Soluciones basadas en la Naturaleza implementadas en Carrión de los Céspedes

En este estudio se han adoptado tres enfoques clave: la optimización de un conjunto de SbN preexistentes, la implementación de una SbN, y la introducción de una tecnología ambientalmente sostenible. Estas estrategias se han propuesto para abordar los desafíos identificados en la región y alcanzar los objetivos centrados en mejorar la gestión del ciclo del agua.

APLICACIÓN DE SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DEL AGUA EN LA REGIÓN MEDITERRÁNEA

En primer lugar, evaluamos diferentes combinaciones de varios tipos de Humedales Artificiales para encontrar la más óptima con el fin de tratar aguas residuales que cumplan con el Reglamento de la Unión Europea (2020/741) con fines de riego¹.

Más concretamente, se evalúa el funcionamiento de siete Humedales Artificiales:

1. Configuración híbrida: humedal artificial de flujo subsuperficial vertical (VSSF-1) + flujo subsuperficial horizontal (HSSF).
2. Humedal artificial de flujo subsuperficial vertical (VSSF-2).
3. Configuración híbrida: humedal artificial de flujo subsuperficial vertical (VSSF-3) + Humedal artificial de superficie de agua libre (FWS).
4. Humedal con helófitas flotantes (FLH-1).
5. Humedal con helófitas flotantes (FLH-2).
6. Humedal con tratamiento aireado.
7. Humedal artificial de flujo subsuperficial vertical con doble etapa.



¹ Los humedales artificiales están diseñados para emplear los mismos principios biológicos, físicos y químicos que los humedales naturales, utilizando plantas y microorganismos para filtrar y purificar el agua de manera efectiva. Estos sistemas se han convertido en una herramienta clave en la gestión sostenible del agua, permitiendo un tratamiento de aguas residuales eficiente, natural y rentable, al tiempo que reducen la contaminación y mejoran la calidad del agua en diversos entornos (21).

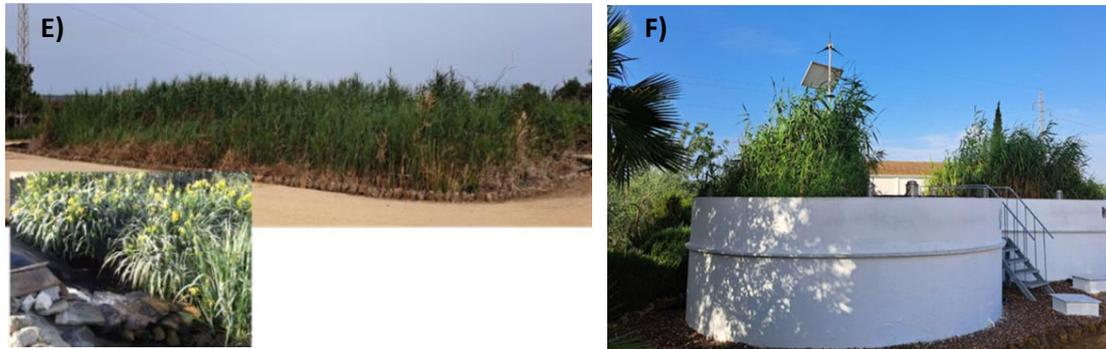


Figura 2. Combinación de siete Humedales Artificiales para mejorar su rendimiento: A) Humedal artificial de flujo subsuperficial vertical, B) Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal, C) Humedal con tratamiento aireado, D) Humedal con helófitas flotantes, E) Humedal artificial de superficie de agua libre, F) Humedal artificial de flujo subsuperficial vertical con doble etapa

En segundo lugar, se implementa un sistema de Jardines Flotantes (Figura 3) en un tanque de almacenamiento de agua tratada por los Humedales Artificiales². En el caso concreto de nuestro Caso de Estudio, se han implementado módulos flotantes cuadrados (60x60 cm) que se autoorganizan de manera orgánica en el tanque, con el objetivo de evitar la evaporación del agua, prevenir el crecimiento de microalgas y aumentar la capacidad de almacenamiento. Los jardines son autosuficientes, y están formados por distintas capas que optimizan la captación de agua y minimizan el calentamiento del sistema.



Figura 3. Jardines Flotantes implementados en tanque de almacenamiento de agua para riego

² Los jardines flotantes son sistemas ecológicos autosuficientes que no solo crean hábitats para especies acuáticas y terrestres, sino que también conectan diferentes ecosistemas en áreas urbanas. Estos jardines promueven la biodiversidad al mejorar el entorno para especies nativas, proporcionando un hábitat adicional que ayuda a revitalizar las áreas en las que se implementan. Su versatilidad en diseño y materiales permite adaptarlos a distintos entornos y objetivos específicos, lo que los convierte en una solución innovadora para afrontar desafíos ambientales y mejorar la sostenibilidad de infraestructuras de agua (22).

Además, como parte de la cobertura vegetal de los jardines, se han seleccionado especies autóctonas de *Sedum* adaptadas a condiciones de escasez de agua.



Figura 4. Especies seleccionadas para los Jardines Flotantes: A) *Sedum sediforme* (herbarivirtual.uib.es/); B) *Sedum sexangulare* (carex.cat/es/); C) *Sedum spurium* (carex.cat/es/); D) *Sedum album* (carex.cat/es/); E) *Sedum reflexum* (floresyplantas.net); F) *Sedum polytrichoides* (worldofsucculents.com); G) *Sempervivum tectorum* (theoriginalgarden.com)

En tercer lugar, estudiamos el efecto de la tecnología de ultrasonidos en la calidad del agua tratada por los Humedales Artificiales³. En este caso, se implementan dos equipos de ultrasonidos en un tanque y laguna de almacenamiento para mejorar la calidad de agua almacenada (Figura 5).

³ El ultrasonido utiliza ondas sonoras de alta frecuencia para generar cavitación, un proceso donde la formación y colapso de burbujas en un líquido libera energía en forma de altas temperaturas y presiones locales. Este fenómeno permite la descomposición de contaminantes orgánicos sin necesidad de productos químicos tóxicos ni la generación de residuos peligrosos. Esta técnica ha sido aplicada con éxito en áreas como el tratamiento de aguas, la estabilización de lodos, la remediación de suelos contaminados y la purificación del aire. A diferencia de los métodos convencionales, es una tecnología respetuosa con el medio ambiente, de bajo coste y compacta, lo que permite su implementación en el sitio para eliminación de contaminantes difíciles, mejorando la eficiencia en la remediación de suelos y tratamiento de aguas residuales (23). El ultrasonido, genera burbujas en el agua que implosionan, afectando a las algas rompiendo sus vacuolas de gas, alterando sus membranas, lilo que afecta a su fotosíntesis y ciclo celular. Como resultado, se previenen las floraciones de algas, reduciendo la obstrucción de filtros y mejorando la calidad del agua, disminuyendo los costos de tratamiento (24).



Figura 5. Implementación de sistema de ultrasonidos en: A) laguna de almacenamiento de agua para riego; B) en tanque de almacenamiento

4.3. Metodología de evaluación

Se ha desarrollado un marco de evaluación basado en indicadores ambientales, sociales y económicos, formado por diferentes Indicadores clave de desempeño (KPI, por sus siglas en inglés) con el objetivo de evaluar el impacto de las SbN implementadas en la provisión de Servicios Ecosistémicos (SE). Estos indicadores, formados por diferentes parámetros a su vez, se dividen en dos grupos principales: Servicios Ecosistémicos relacionados con el agua y Servicios Ecosistémicos dependientes del agua, siguiendo el Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo(16). Los SE relacionados con el agua se refieren a los KPIs relacionados con la calidad y cantidad del agua. Los SE dependientes del agua cubren el valor ambiental, social y económico, así como los servicios de regulación para la mitigación del cambio climático. A su vez, los KPI se dividen a su vez en cuatro categorías, siguiendo la clasificación de la Evaluación de Ecosistemas del Milenio: KPI de aprovisionamiento, de regulación, culturales y de apoyo(17,18).

Los indicadores que aquí se describen se han extraído de la publicación «*Evaluating the Impact of Nature-Based Solutions: a Handbook for Practitioners*» (19), aunque también se pueden consultar otros muchos recursos valiosos. La selección de los indicadores del caso de estudio se ha hecho en base a los retos ambientales y sociales de la zona, las SbN a implementar y los beneficios y SE relacionados. Igualmente, se han alineado con los requerimientos de los ocho criterios que contempla el Estándar Global para SbN de la UICN (20).

Con el fin de determinar el impacto del uso de las SbN, se lleva a cabo la línea base mediante la monitorización de los indicadores seleccionados previo a su implementación. La comparación de estos datos, con los datos obtenidos tras la aplicación de las SbN, servirá para realizar una evaluación más precisa de sus beneficios y posibles limitaciones, lo cual permitirá identificar mejoras, para un uso más adecuado, sostenible y duradero de las SbN. En la Tabla 1 se enumeran los diferentes KPI usados en el caso de estudio de Carrión de los Céspedes:

CONAMA 2024

APLICACIÓN DE SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DEL AGUA EN LA REGIÓN MEDITERRÁNEA

Tabla 1. Indicadores ambientales, sociales y económicos seleccionados para el Caso de Estudio 1 – Carrión de los Céspedes

Servicio Ecosistémico (SE)	KPI seleccionado para el proyecto	
SE relacionados con el agua	Provisionamiento	Aumento en el uso de agua tratada (para fines de riego)
		Recursos totales de agua dulce
	Regulación	Capacidad de retención de agua en el suelo
		Capacidad/Tasa de infiltración
		Escorrentía superficial en relación con la cantidad de precipitación
		Calidad hidromorfológica de las aguas superficiales
		* Eliminación de nutrientes por humedales
		Calidad del agua en ecosistemas acuáticos (sedimentos, turbidez, fosfatos y nitratos, oxígeno disuelto, crecimiento de algas, salinidad, contenido total de bacterias fecales)
		* Calidad del agua en tanques de almacenamiento
		* Temperatura del agua
		Monitoreo de especies bio-indicadoras (aire y agua)
		Volumen de aguas residuales tratadas
	* Tasa de evaporación/evapotranspiración	
	Provisionamiento	Producción agrícola, ganado y producción de pescado
Regulación	Número de marcos regulatorios locales, regionales, nacionales y europeos que el proyecto ayuda a materializar	
	Nuevas leyes o regulaciones, o modificaciones a las existentes	
Apoyo	* Diversidad de especies	
	Número de especies nativas	
	* Contenido de materia orgánica del suelo	
	* Parámetros de fertilidad del suelo	
	Superficie de áreas protegidas influenciadas por la implementación del estudio de caso	
	Número de nuevas mejores prácticas compartidas sobre FWC-SbN para la gestión sostenible del agua de NATMed	
	Número de mejores prácticas compiladas sobre FWC-SbN para la gestión sostenible del agua de otros proyectos	
	Cultural	Apego al lugar: identidad del lugar o “sentido del lugar”
		Bienestar general y felicidad, percepción de comodidad
		Número de visitantes a los sitios por año
Número de estudiantes beneficiados		
Número total de excursiones educativas en un sitio		
Mayor conciencia de los habitantes de las áreas de demostración sobre los temas definidos		
Número de publicaciones científicas y patentes		
Participación ciudadana en actividades de educación ambiental		
Número de <i>Living Labs</i>		
Número de programas de televisión, estudios, libros, etc. que presentan los sitios y el área circundante		

CONAMA 2024

APLICACIÓN DE SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DEL AGUA EN LA REGIÓN MEDITERRÁNEA

Inclusión de grupos sociales vulnerables
Participación los actores principales en la co-creación/co-diseño de SbN
Valoración de SbN: valor de SbN calculado usando GI-Val
Número de nuevas actividades económicas
Número de empleos creados
Número de ODS que cubre el proyecto
Grado de satisfacción con los beneficios generados por el proyecto

* KPIs más representativos del caso de estudio de Carrión de los Céspedes, presentados en el apartado de resultados.

Igualmente, dentro de la metodología de evaluación se ha incluido de manera transversal el uso del Estándar Global para SbN de la UICN, como una herramienta holística que permite analizar el impacto de las SbN a implementar en diferentes áreas, desde cómo afronta los retos sociales hasta su contribución en el logro de diferentes objetivos de desarrollo sostenible (los ODS, por ejemplo), pasando por el impacto social, económico, la gobernanza inclusiva, la biodiversidad, la conectividad ecológica, el monitoreo y evaluación, la influencia en políticas relacionadas, etc.

Esta herramienta, que ha sido aplicada desde la fase de diseño, constituye un marco práctico y teórico, que, por un lado permite acompañar y mejorar las SbN a través de la identificación de áreas de mejora y la extracción de recomendaciones y buenas prácticas, y por otro, sirve para validar las intervenciones y valorar su potencial de impacto en base a su nivel de adherencia al Estándar; contiene y complementa al mismo tiempo, la evaluación en base a la medición de los diferentes indicadores desglosados arriba.

5. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados de la evaluación inicial del caso de estudio, realizada antes de la implementación de las SbN. Los datos corresponden a los siguientes parámetros: eliminación de nutrientes por los humedales, calidad de agua en ecosistemas acuáticos, temperatura del agua, cálculo de evaporación/evapotranspiración, contenido de materia orgánica del suelo y parámetros de fertilidad del suelo. Estos son considerados los más representativos de los efectos clave de las SbN, dado que estos parámetros permiten medir de manera integral su impacto en la mejora de la calidad del agua, la regulación del ciclo hídrico y la salud del suelo. La eliminación de nutrientes por los humedales es clave para evaluar la capacidad de las SbN en la depuración del agua, reduciendo la concentración de contaminantes. La calidad de agua en ecosistemas acuáticos nos permite analizar la respuesta de los cuerpos de agua a las intervenciones, garantizando un ambiente adecuado para la biodiversidad acuática. La temperatura del agua y el cálculo de evaporación/evapotranspiración son cruciales para comprender cómo las SbN influyen en los procesos de regulación climática local. Finalmente, el contenido de materia orgánica del suelo y los parámetros de fertilidad permiten medir la mejora en la calidad del suelo, esencial para sostener la productividad agrícola y la salud de los ecosistemas terrestres.

5.1. Eliminación de nutrientes por los humedales

Los parámetros nutricionales medidos en la salida de los humedales construidos y el sistema de filtración son NO_3 , NH_4 , PO_4 , nitrógeno total y fósforo total. Esto es debido a su eficacia a la hora de reducir los niveles de estos a través de varias etapas de tratamiento. El objetivo es evaluar la eficiencia del sistema para mantener las concentraciones de nutrientes dentro de los límites necesarios para evitar la contaminación por nutrientes y el riesgo de eutrofización.

La monitorización de estos parámetros corresponde al periodo de marzo de 2021 a septiembre de 2023. Esta, se llevó a cabo a la salida de los humedales (ver Tabla 2), y en otros puntos del sistema de riego, tales como la laguna de almacenamiento, el sistema de filtración y red de riego (Tabla 3).

Tabla 2. Valores promedios, máximos y mínimos de la evaluación inicial a la salida de los humedales artificiales

Parámetro	Promedio (mg/L)	Máximo (mg/L)	Mínimo (mg/L)	Límite recomendado (mg/L)
Nitrógeno total	35,4	56,7	14,2	≤ 20 *
NO_3	41,0	355,0	2,2	≤ 50
NH_4	5,3	20,8	0,6	$\leq 2-3$
Fósforo total	7,0	10,1	3,5	≤ 2
PO_4	6,5	9,1	3,0	≤ 2

* Valores establecidos según el Reglamento EU 2020/741

CONAMA 2024

APLICACIÓN DE SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DEL AGUA EN LA REGIÓN MEDITERRÁNEA

Sin embargo, la concentración de estos parámetros varía desde este punto, hasta la salida del sistema de filtración (ver Tabla 3).

Tabla 3. Valores promedios, máximos y mínimos de la evaluación inicial en la salida del sistema de filtración

Parámetro	Promedio (mg/L)	Máximo (mg/L)	Mínimo (mg/L)	Límite recomendado (mg/L)
Nitrógeno total	15,7	31,0	4,7	≤ 20 *
NO₃	6,2	20,8	0,0	≤ 50
NH₄	1,3	3,0	0,4	≤ 2-3
Fósforo total	3,0	6,5	0,7	≤ 2
PO₄	2,1	5,6	0,5	≤ 2

* Valores establecidos según el Reglamento EU 2020/741

En base a los resultados de la línea base, las concentraciones de nutrientes disminuyen de forma progresiva en los puntos de muestreo siguientes a los humedales construidos. Los niveles de nitrógeno total del agua tratada por los humedales construidos tras la salida del sistema de filtración y que llega a la red de riego se mantiene por debajo del límite de 20 mg/L establecido por el Reglamento EU 2020/741, recogido en el nuevo Real Decreto 1085/2024 que establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas regeneradas en España. A su vez, el resto de parámetros también se mantienen dentro de los límites comúnmente recomendados. Estos resultados muestran la efectividad del sistema actual de humedales para el tratamiento y la reutilización de agua para riego.

5.2. Calidad de agua en ecosistemas acuáticos

Respecto a la calidad de agua, los parámetros que se han tenido en cuenta son los nitratos, el ión fosfato, los sólidos suspendidos totales (SST), la conductividad, el pH, el oxígeno disuelto (OD), la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), la demanda química de oxígeno (DQO), la presencia de *E. Coli*, y la concentración de clorofila A. Cada uno de estos proporciona información clave sobre distintos aspectos de la composición y estado del agua, permitiendo evaluar su aptitud para la reutilización del agua en riego agrícola.

Al igual que en el caso de la eliminación de nutrientes, el periodo de monitorización fue desde marzo de 2021 hasta septiembre de 2023, realizándose los muestreos a la salida de los humedales artificiales, el estanque de almacenamiento, y el sistema de filtración:

Tabla 4. Promedios de la evaluación inicial de los parámetros de calidad de agua en la salida de los humedales artificiales, laguna de almacenamiento, y sistema de infiltración

Parámetro	Unidad	Promedio de los Humedales Artificiales	Promedio laguna de almacenamiento	Promedio sistema de filtración	Valores recomendados
-----------	--------	--	-----------------------------------	--------------------------------	----------------------

CONAMA 2024

APLICACIÓN DE SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DEL AGUA EN LA REGIÓN MEDITERRÁNEA

NO₃	mg/L	5,3	1,0	1,3	≤ 50
PO₄	mg/L	6,5	2,4	2,1	≤ 2
SST	mg/L	20,7	36,6	56,3	≤ 35*
Conductividad	μS/cm	1208,8	1096,2	1167,8	≤ 70000 - 30000
pH		7,4	8,9	8,9	6-9
OD	mg/L	2,4	6,3	5,7	>2
DBO₅	mg/L	19,1	26,7	36,6	≤ 25**
DQO	mg/L	73,7	116,8	156,4	≤ 125**
E. Coli	UFC/100 mL	2x10 ⁵	2x10 ²	6x10 ¹	≤ 1000*
Clorofila A	μg/L	21,8	326,5	463,9	

* Valores establecidos según Reglamento EU 2020/741

** Valores establecidos según Directiva 91/271

Resumidamente, las conclusiones que se pueden sacar de estos datos correspondientes a la evaluación inicial son las siguientes:

- pH: aumenta desde 7,4 en la salida de los humedales hasta 8,9 en la laguna de almacenamiento y el sistema de filtración, debido al crecimiento de algas. A pesar de este aumento, los niveles se mantienen dentro de los límites establecidos por la normativa nacional.
- SST y Clorofila-A: aunque disminuyen en la salida de los humedales, aumentan en la laguna de almacenamiento por el crecimiento de microalgas y luego vuelven a bajar tras la filtración, superando los límites establecidos por la Directiva 91/271 y el Reglamento EU 2020/741, para el caso de los SST
- DQO y DBO₅: se reducen significativamente en los humedales (85% y 93%), pero aumentan en la laguna por las floraciones de algas, superando los niveles establecidos por la Directiva 91/271 y el Reglamento EU 2020/741, respectivamente.
- NO₃ Y PO₄: muestran una disminución progresiva desde la balsa de almacenamiento.
- E. coli: las concentraciones en las balsas de almacenamiento están por debajo de los límites establecidos para el riego de olivares según el reglamento EU 2020/741.
- Conductividad: el valor se mantiene estable a lo largo de los diferentes puntos de muestreo entre 1100-1200 μS/cm.

Por lo tanto, cabe destacar que a pesar de la eficacia de los humedales artificiales para eliminar contaminantes y mejorar la calidad del agua, actualmente no se están alcanzando todos los requisitos de calidad establecidos por la normativa para agua regenerada, especialmente para los niveles de SST y DBO₅. Sin embargo, si se cumple a nivel de concentración de E. coli.

5.3. Temperatura del agua

La temperatura del agua, que refleja la energía cinética promedio de sus moléculas, se considera un criterio clave de la calidad del agua, al influir en procesos biológicos y químicos en sistemas acuáticos como los humedales artificiales y los tanques de almacenamiento. Los datos recopilados en evaluación inicial corresponden al periodo comprendido entre marzo de 2021 y septiembre de 2023, registrados en las salidas de los humedales artificiales y los tanques de almacenamiento.

Tabla 5. Valores promedios, máximos y mínimos de la evaluación inicial de la temperatura del agua en la salida de los humedales artificiales y la laguna de almacenamiento

Punto de medida	Promedio (°C)	Máximo (°C)	Mínimo (°C)
Salida de los humedales artificiales	21,2	30,1	12,1
Salida de la laguna de almacenamiento	21,5	28,2	10,5

Las temperaturas promedio en ambos puntos son similares. Sin embargo, en los máximos y mínimos se observa una diferencia de dos grados menos en la salida de la laguna de almacenamiento con respecto a la salida de los humedales artificiales.

La temperatura analizada en ambos puntos se encuentra dentro del rango óptimo para el crecimiento de algas, que oscila entre 20 y 30 °C. Este resultado sugiere que la calidad del agua almacenada puede empeorar debido a este factor.

5.4. Cálculo de evaporación/evapotranspiración

Otro de los factores a medir en el caso de estudio es la medida de la tasa de evaporación de los tanques de riego. Esta puede verse afectada por factores meteorológicos como la radiación solar y la velocidad del viento.

Los datos se analizaron desde 2019 hasta 2023:

Tabla 6. Valores promedio por estaciones del periodo de evaluación inicial de la tasa de evaporación en los tanques de riego de 2019 a 2023

Periodo	2019 (mm)	2020 (mm)	2021 (mm)	2022 (mm)	2023 (mm)	Promedio (2019-2022)	Incremento en 2023
Enero-Marzo	4,57	2,39	2,57	3,75	3,48	3,32	5%
Abril-Junio	5,79	4,49	5,69	6,41	7,37	5,60	32%
Julio-Septiembre	7,87	8,09	7,91	8,44	8,82	8,08	9%
Octubre-Diciembre	2,90	2,86	3,20	2,87	2,11	2,96	-29%

La mayor evaporación ocurre en julio y agosto (periodo también en la que se registran los mayores datos de temperatura). En 2023, la evaporación aumentó en todas las estaciones respecto a años anteriores, excepto en el periodo de octubre a diciembre. El mayor incremento se registró entre abril y junio. El aumento de las tasas de evaporación implica una mayor pérdida de agua en los sistemas de almacenamiento, lo que puede afectar a la disponibilidad de agua. Además, las previsiones de incremento de las temperaturas como consecuencia del cambio climático sugieren que este fenómeno podría intensificarse en los próximos años, exacerbando los desafíos relacionados con la gestión de los recursos hídricos.

5.5. Contenido de materia orgánica del suelo

Este parámetro es fundamental para evaluar la calidad y salud del suelo agrícola, ya que refleja la cantidad de compuestos orgánicos presentes, como los ácidos húmicos, fúlvicos y húmicos, los cuales desempeñan un papel clave en la fertilidad del suelo. Un nivel adecuado de materia orgánica indica una buena fertilidad, aportando nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y azufre, además de mejorar la estructura del suelo y su capacidad para retener agua. El uso de agua regenerada puede influir positivamente en el contenido de materia orgánica al potenciar la actividad microbiana, lo que a su vez optimiza el ciclo de nutrientes. Cuando el agua regenerada aporta nitrógeno y fósforo, y el suelo tiene un nivel óptimo de materia orgánica, se maximiza el uso eficiente de estos nutrientes, reduciendo la necesidad de fertilizantes químicos.

Los datos previos a la implementación de las SbN corresponden a octubre de 2023:

Tabla 7. Contenido de materia orgánica del suelo en la evaluación inicial

Fecha análisis	Profundidad (m)	Materia orgánica (%m/m b.s)	Nivel
23/10/2023	0,30	1,72	Moderado

Como se puede observar en la tabla, el suelo tiene un nivel moderado de materia orgánica, lo cual mejora tanto las propiedades físicas-químicas como biológicas del suelo, facilitando la absorción de nutrientes por las plantas. Este nivel también refuerza la estructura del suelo, previene la erosión y optimiza la retención de agua y nutrientes, además de aumentar la capacidad de campo del suelo.

5.6. Parámetros de fertilidad del suelo

La fertilidad del suelo depende de la disponibilidad de nutrientes esenciales y de factores como el pH y la conductividad, que afectan la solubilidad de los minerales y la absorción de nutrientes por las plantas. En la Tabla 8 se presenta un resumen de los muestreos realizados entre julio de 2022 y octubre de 2023 de los parámetros pH, conductividad eléctrica y macro y micronutrientes del suelo (Fósforo, potasio, nitrógeno, calcio, magnesio, sodio, zinc, boro, cobre, hierro, manganeso). El riego de los cultivos con agua regenerada puede mantener los niveles de pH y conductividad óptimos y además aportar nutrientes que mejoren la fertilidad del suelo.

Tabla 8. Tabla resumen de los promedios de la evaluación inicial entre julio 2022-octubre 2023 de los parámetros de fertilidad del suelo

Parámetro	Resultado promedio	Unidad	Escala
pH	7,02		Ligeramente alcalino-Neutro
Conductividad eléctrica	447,94	μS/cm	No salino
Fósforo	23,14	mg/kg	Bajo-normal
Potasio	0,28	meq/100g	Muy bajo-bajo
Nitrógeno	925,44	mg/kg	Bajo-normal*
Calcio	69,61	mg/L	Muy bajo
Magnesio	6,63	mg/L	Muy bajo
Sodio	22,15	mg/L	Muy bajo
Zinc	15,18	mg/kg	Normal*
Boro	0,33	mg/kg	Bajo
Cobre	59,32	mg/kg	Normal
Hierro	100,80	mg/kg	Alto
Manganeso	92,43	mg/kg	Normal

*El muestreo de octubre de 2023 dio un nivel de nitrógeno muy bajo, y de zinc un valor no estándar (por debajo de lo normal), considerándose estos valores muy diferente a los de los otros muestreos

El suelo muestra una ligera alcalinidad, tirando a pH neutro, y características no salinas. La alcalinidad puede impedir el óptimo desarrollo de las plantas, pero en este caso es una ligera alcalinidad por lo que no supone un gran problema. Respecto a la no salinidad, favorece la absorción de agua y nutrientes lo que ayuda al buen desarrollo de los cultivos.

Por otro lado, el fósforo es ligeramente bajo, lo cual podría afectar a la planta debido a su importancia en el desarrollo, fotosíntesis y la asimilación de nutrientes. Sin embargo, en este caso no está afectando al crecimiento de los cultivos. El potasio, en los niveles en los que se encuentre (muy bajo-bajo), puede causar clorosis, necrosis foliar, o afectar la producción. Los niveles bajos de nitrógeno pueden venir de la absorción post-cosecha por el cultivo. El calcio y el magnesio, a pesar de estar en niveles bajos, no presentan problemas estructurales.

El sodio es bajo, evitando efectos negativos. El zinc y el boro, aunque en niveles bajos, no causan daños significativos. El cobre y el manganeso están en niveles óptimos, garantizando un buen desarrollo de la planta. El hierro es alto, y aunque no se observan problemas inmediatos, podría afectar a largo plazo.

5.7. Diversidad de especies

Este parámetro es un indicador del número de especies que forman parte de una determinada comunidad. En este caso, se ha realizado un conteo de las especies vegetales, sin tener en cuenta

su abundancia, realizando una distinción entre las especies nativas y no nativas (introducidas por actividades humanas) del caso de estudio de Carrión de los Céspedes.

En la siguiente gráfica se puede ver de forma visual la riqueza de estas especies vegetales:

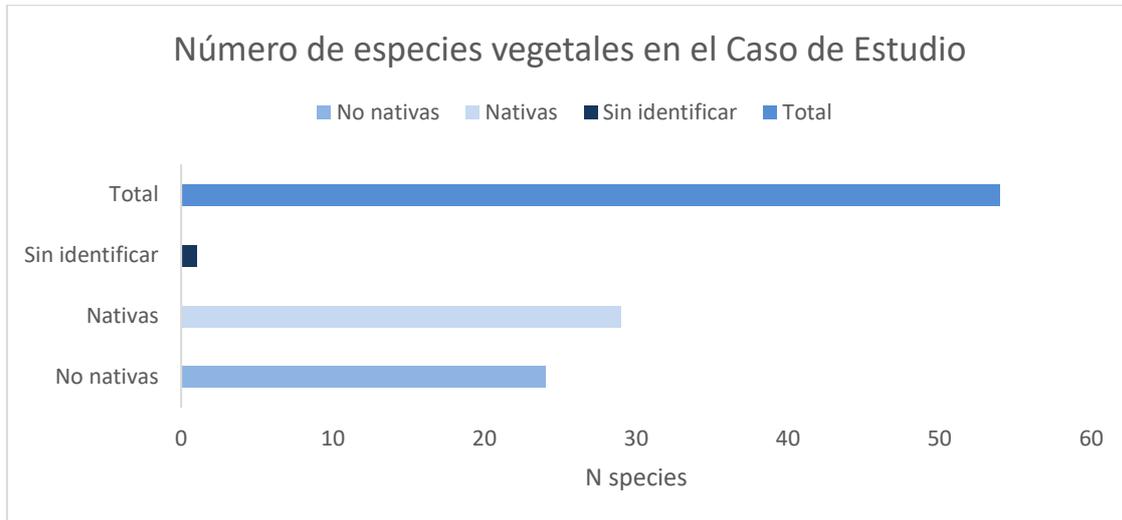


Figura 6. Gráfica de la riqueza de diversidad de especies, con la diferenciación entre especies nativas y no nativas, y las no identificadas.

Como se puede observar en la figura, se han encontrado 54 especies vegetales distintas en Carrión de los Céspedes, de las cuales 29 son nativas, 24 son no nativas, y hay una especie que aún no ha sido identificada. Aunque hay un elevado porcentaje de especies que se encuentran típicamente en la región mediterránea y, más específicamente, en el suroeste de España, el porcentaje de especies vegetales no nativas es marcadamente similar. Esto refleja el hecho de que el área abarcada por el Centro Experimental es una zona controlada, con un continuo mantenimiento de las zonas de jardín. De las especies no nativas, algunas están bien integradas en el paisaje mediterráneo, como el eucalipto (*Eucalyptus camaldunensis*) y el naranjo (*Citrus sinensis*). Otras especies se consideran exóticas y representan principalmente especies ornamentales de jardín, como el cerezo japonés (*Prunus serrulata*) y la planta de yuca (*Yuca schidigera*).

En general, valorar si un número concreto de especies es alto o bajo es complejo, ya que esta valoración depende muy específicamente del contexto del área evaluada. Hemos podido comprobar que el número de especies presentes en el Centro Experimental ha aumentado con respecto al último estudio, realizado en 2012. Este estudio indicaba un número de unas 38 especies, habiéndose incrementado éste en al menos 16. En conclusión, el aumento del número de especies vegetales en el Centro Experimental, con respecto al estudio de 2012, sugiere un incremento en la biodiversidad de la zona, lo que destaca la importancia de continuar monitoreando y evaluando estos cambios para comprender mejor las dinámicas ecológicas en el área. El aumento de la diversidad de especies es crucial no solo porque contribuye a la estabilidad y resiliencia de los ecosistemas, sino también porque promueve una mayor capacidad de adaptación frente a cambios ambientales y mejora los Servicios Ecosistémicos fundamentales, como la polinización, el control de plagas y la fertilidad del suelo.

5.8. KPI culturales

La medición del impacto de las SbN se ha realizado con el fin de obtener una idea más certera de los beneficios que estas proporcionan a la población, así como identificar las barreras y necesidades sociales. Con ello, se ha determinado en el Caso de Estudio de Carrión de los Céspedes que la población valora fuertemente las tradiciones locales y culturales, así como la tranquilidad y situación geográfica de la zona, destacando también que perciben poca concienciación sobre los problemas medioambientales. En general, el perfil técnico entrevistado comunica que en la región se identifica la sequía como el principal problema. Por otro lado, se aprecia un sentimiento de identidad y de formar parte de una comunidad, además de considerar que tienen una alta calidad de vida en su zona, destacando la existencia de espacios verdes.

Respecto a las percepciones de la planta experimental de aguas residuales, tanto la población local como el grupo de técnicos, tienen una opinión positiva o muy positiva: la población local opina que es “interesante” o “muy interesante” y destacan que la planta de experimentación de SbN se parece más a un jardín que a una depuradora. Por su parte, los expertos la califican de innovadora, única y con un enorme potencial para desarrollar métodos de tratamientos de aguas residuales respetuosos con el medioambiente.

Además, en cuanto a los riesgos sociales, se califica de “moderada” la falta de empresas locales o nacionales con experiencia en SbN innovadora.

6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La evaluación inicial de los indicadores clave del caso de estudio muestran el estado de parámetros clave como la calidad del agua, calidad del suelo y biodiversidad. Se ha observado que en general, la calidad de agua regenerada para riego cumple con los límites establecidos por la normativa. Sin embargo, se ha observado un aumento de los sólidos en suspensión y la clorofila A en los sistemas de almacenamiento debido al crecimiento de microalgas, lo que afecta la calidad del agua, y deberá abordarse mediante la optimización de los humedales construidos e instalación de ultrasonidos. Estos resultados indican que los humedales artificiales contribuyen a la eliminación de contaminantes, pero que debe tenerse en cuenta el sistema completo para asegurar que el agua regenerada llegue con una calidad de agua adecuada al sistema de riego.

En relación con la biodiversidad, se ha observado un incremento en el número de especies vegetales presentes en el área del Centro Experimental en comparación con estudios anteriores. Actualmente, se han registrado 54 especies, un aumento considerable respecto a las 38 identificadas en 2012. Este aumento refleja un crecimiento en la diversidad biológica del área, que incluye tanto especies nativas, típicas de la región mediterránea, como no nativas, algunas de las cuales están bien integradas en el paisaje. No obstante, la presencia de especies exóticas, en su mayoría ornamentales, subraya el impacto de las zonas ajardinadas y el mantenimiento controlado en el entorno del Centro. Este aumento en la biodiversidad destaca la importancia de seguir monitoreando el equilibrio ecológico, especialmente en un entorno donde las intervenciones humanas son continuas.

En términos de calidad del suelo, el contenido de materia orgánica muestra niveles moderados, lo que favorece a la estructura del suelo y su capacidad para retener agua y nutrientes. La tendencia a la baja de los macronutrientes, que persiste en niveles bajos y muy bajos, pone de manifiesto una carencia resultante por la ausencia de incorporación de fertilizantes al suelo. Esta deficiencia puede suponer un riesgo para la calidad del suelo y, en consecuencia, para el crecimiento y el potencial de rendimiento de los cultivos. Por lo tanto, los aportes de nutrientes provenientes del agua regenerada serán cruciales para mejorar y mantener la calidad del suelo a lo largo del tiempo. En cuanto a la evaporación, los datos sugieren que las tasas más altas se producen durante los meses más cálidos, lo que indica una mayor pérdida de agua, especialmente en verano.

Los resultados de la línea base resaltan la importancia de implementar SbN para enfrentar los desafíos relacionados con la calidad y la disponibilidad de agua para riego. Las SbN desarrolladas en el proyecto NATMed están diseñadas específicamente para abordar estos retos. Se espera que su implementación contribuya a mejorar los indicadores de manera significativa.

La optimización de los humedales construidos incrementará considerablemente su capacidad de eliminación de nutrientes. Los humedales han demostrado ser efectivos como etapa previa en el sistema de filtración para regenerar el agua destinada al riego, contribuyendo a la reducción de nitrógeno y fósforo. Sin embargo, una optimización adicional puede aumentar su capacidad de retención y eliminación de contaminantes, asegurando que los niveles de nutrientes se mantengan consistentemente por debajo de los límites legales y reduciendo el riesgo de eutrofización. Además, el uso de ultrasonidos combinado con la optimización de los humedales mejorará la calidad del agua. Los ultrasonidos, al romper las membranas celulares

de las algas y reducir su proliferación, ayudarán a controlar la formación de microalgas en los tanques de almacenamiento, mejorando la transparencia del agua y disminuyendo la carga orgánica. Esta intervención reducirá los niveles de DBO₅, DQO y sólidos en suspensión, mejorando la calidad general del agua.

La implementación de jardines flotantes en los tanques de almacenamiento de agua reducirá la temperatura del agua. Al proporcionar sombra y reducir la radiación solar directa sobre la superficie del agua, los jardines flotantes limitarán el calentamiento excesivo, disminuyendo la posibilidad de floraciones algales y estabilizando la temperatura para condiciones óptimas de almacenamiento. A su vez, los jardines flotantes también jugarán un papel clave en la reducción de las tasas de evaporación, uno de los desafíos más importantes del proyecto. Al cubrir parcialmente la superficie del agua, los jardines flotantes minimizarán la exposición al sol, lo que permitirá una retención de agua más eficiente durante los meses de mayor calor.

El uso de agua regenerada tratada mediante los humedales para riego agrícola se espera que mejore el contenido de materia orgánica del suelo. El agua regenerada aporta una cantidad adicional de nitrógeno y fósforo, que contribuirá al desarrollo microbiano y al equilibrio de nutrientes, incrementando el contenido de materia orgánica y mejorando la estructura del suelo, permitiendo así mismo, reducir la aplicación de fertilizantes convencionales, contribuyendo a la implementación del concepto de economía circular. Además, los nutrientes adicionales presentes en el agua regenerada también mejorarán los parámetros de fertilidad del suelo. El riego con agua regenerada optimizará los niveles de fertilidad del suelo, favoreciendo el desarrollo de cultivos más saludables y productivos.

Por último, tanto los humedales artificiales como los jardines flotantes favorecen la diversidad de especies. Estos sistemas naturales crean hábitats favorables para especies nativas de flora y fauna acuática, promoviendo la biodiversidad y contribuyendo a la resiliencia ecológica del área.

Para ello, los siguientes pasos se centrarán en continuar monitorizando estos indicadores durante un periodo mínimo de un año. Al final de este plazo, se compararán los datos obtenidos tras la implementación de las SbN con los datos de la línea base. Este análisis permitirá evaluar de manera precisa el impacto de las SbN en la calidad y disponibilidad del agua, contribuyendo a una gestión más sostenible de los recursos hídricos en la región mediterránea, así como su influencia en otros aspectos de carácter socioeconómico, sobre la biodiversidad, la gobernanza, los retos sociales existentes, etc. Demostrar la efectividad de estas soluciones es crucial, por lo tanto, no solo para validar su aplicación en este caso de estudio, sino también para fomentar su replicación en otras regiones con desafíos similares. La implementación exitosa de SbN puede convertirse en una estrategia escalable que mejore la gestión del agua, optimice la biodiversidad y promueva la adaptación al cambio climático en áreas vulnerables del Mediterráneo.

7. DISCLAIMER

Este Proyecto forma parte del Programa PRIMA y está apoyado por la Unión Europea (Grant Agreement No 2221). Las opiniones y puntos de vista expresados solo comprometen a sus autores y no reflejan necesariamente las de la Unión Europea ni las del Programa PRIMA. Ni la Unión Europea ni el Programa PRIMA pueden ser considerados responsables por ellas.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Food and Agriculture Organization of the United Nations [Internet]. [cited 2024 Jul 10]. Available from: <https://www.fao.org/news/story/en/item/456243/icode/>
2. The 2020 edition of the State of the Environment and Development in the Mediterranean (SoED) | UNEP MAP [Internet]. [cited 2024 Sep 27]. Available from: <https://www.unep.org/unepmap/resources/2020-edition-state-environment-and-development-mediterranean-soed>
3. Yang D, Yang Y, Xia J. Hydrological cycle and water resources in a changing world: A review. *Geography and Sustainability*. 2021 Jun 1;2(2):115–22.
4. Lee H, Romero J. Climate Change 2023 Synthesis Report IPCC, 2023: Sections. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team. :35–115.*
5. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Mediterranean Region. *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability*. 2023 Jun 29;2233–72.
6. Progress on Integrated Water Resources Management – 2021 Update | UN-Water [Internet]. [cited 2024 Aug 29]. Available from: <https://www.unwater.org/publications/progress-integrated-water-resources-management-2021-update>
7. Orientaciones Estratégicas sobre Agua y Cambio Climático. [cited 2024 Sep 3]; Available from: www.miteco.gob.es
8. Cantonati M, Poikane S, Pringle CM, Stevens LE, Turak E, Heino J, et al. Characteristics, Main Impacts, and Stewardship of Natural and Artificial Freshwater Environments: Consequences for Biodiversity Conservation. *Water* 2020, Vol 12, Page 260 [Internet]. 2020 Jan 16 [cited 2024 Aug 29];12(1):260. Available from: <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/1/260/htm>
9. Migliavacca M, Musavi T, Mahecha MD, Nelson JA, Knauer J, Baldocchi DD, et al. The three major axes of terrestrial ecosystem function. *Nature* 2021 598:7881 [Internet]. 2021 Sep 22 [cited 2024 Aug 29];598(7881):468–72. Available from: <https://www.nature.com/articles/s41586-021-03939-9>
10. Levia DF, Creed IF, Hannah DM, Nanko K, Boyer EW, Carlyle-Moses DE, et al. Homogenization of the terrestrial water cycle. *Nature Geoscience* 2020 13:10 [Internet]. 2020 Sep 21 [cited 2024 Aug 29];13(10):656–8. Available from: <https://www.nature.com/articles/s41561-020-0641-y>
11. Thomaz SM. Ecosystem services provided by freshwater macrophytes. *Hydrobiologia* 2021 850:12 [Internet]. 2021 Dec 6 [cited 2024 Aug 29];850(12):2757–77. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10750-021-04739-y>
12. Bhowmik S. Ecological and economic importance of wetlands and their vulnerability: A review. *Current State and Future Impacts of Climate Change on Biodiversity*. 2019 Nov 29;95–112.

CONAMA 2024

APLICACIÓN DE SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DEL AGUA EN LA REGIÓN MEDITERRÁNEA

13. Ferreira CSS, Kašanin-Grubin M, Solomun MK, Sushkova S, Minkina T, Zhao W, et al. Wetlands as nature-based solutions for water management in different environments. *Curr Opin Environ Sci Health*. 2023 Jun 1;33:100476.
14. World Water Development Report 2018 | UN-Water [Internet]. [cited 2024 Sep 2]. Available from: <https://www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2018>
15. Union PO of the E. Evaluating the impact of nature-based solutions : a handbook for practitioners. 2021 May 4 [cited 2024 Sep 2]; Available from: <https://op.europa.eu/es/publication-detail/-/publication/d7d496b5-ad4e-11eb-9767-01aa75ed71a1>
16. UN World Water Development Report 2017 | UN-Water [Internet]. [cited 2024 Oct 24]. Available from: <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2017>
17. Farmer A. The economics of ecosystems and biodiversity for water and wetlands. Institute for European Environmental Policy (IEEP) <https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/pdf/cop11/ppt/cop11-ppt-192-farmer.pdf>. 2012;
18. Nature-based Solutions for Water [Internet]. [cited 2024 Oct 28]. Available from: <https://digital.iucn.org/water/nature-based-solutions-for-water/>
19. Innovation ECDG for R and. Evaluating the impact of nature-based solutions – A handbook for practitioners. Publications Office of the European Union; 2021.
20. Guidance for using the IUCN Global Standard for Nature-based Solutions : first edition | IUCN Library System [Internet]. [cited 2024 Oct 29]. Available from: <https://portals.iucn.org/library/node/49071>
21. Padilla Santillán NG, Ortiz Díaz EG, Estupiñan Rodríguez LD. Sistema de humedales artificiales en procesos de tratamiento de aguas en la refinería del cantón Esmeraldas, Ecuador. *Polo del Conocimiento: Revista científico - profesional*, ISSN-e 2550-682X, Vol 6, N° 5, 2021, págs 677-692 [Internet]. 2021 [cited 2024 Aug 30];6(5):677–92. Available from: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8016922&info=resumen&idioma=SPA>
22. Floating gardens [Internet]. [cited 2024 Sep 4]. Available from: <https://www.urbangreenup.eu/solutions/floating-gardens.kl>
23. Pham TD, Shrestha RA, Virkutyte J, Sillanpää M. Recent studies in environmental applications of ultrasound. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2009 Nov;36(11):1849–58.
24. Rajasekhar P, Fan L, Nguyen T, Roddick FA. A review of the use of sonication to control cyanobacterial blooms. *Water Res* [Internet]. 2012 Sep 15 [cited 2024 Sep 30];46(14):4319–29. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22727861/>