

# **Urban River Lab -Technical Reports- vol. 6**



**Evaluación de sistemas de depuración de aguas residuales  
alternativos para tratar casas aisladas**

Mayo-Setiembre 2023



# 1. Introducción

## 1.1 Antecedentes

Las EDAR juegan un papel fundamental a la hora de reducir las cargas de materia orgánica y nutrientes (nitrógeno y fósforo) de las aguas residuales producidas por la actividad humana. En este sentido, la implementación de las EDAR desde el 1990 han mejorado la calidad de las aguas de los ecosistemas fluviales receptores. La OMS y UNICEF estiman que, en el Estado Español, y por extensión en Cataluña, el porcentaje de la población que tiene acceso a los servicios de saneamiento es del 100%. A pesar de estos datos, todavía quedan algunos pequeños núcleos urbanos y dispersos (la mayoría con población inferior a 2.000 habitantes) que no tienen un sistema consolidado de saneamiento (Informe del CADS 3/2016). En concreto, en 2019 se estimaba que el 2.9% de la población todavía no disponía de un sistema de saneamiento adecuado para tratar las aguas residuales generadas. Aunque el caudal asociado a estas aguas residuales no es muy relevante, la carga de materia orgánica y nutrientes sí que es elevada y puede tener efectos adversos en ríos receptores que normalmente son pequeños. En el informe 3/2015, sobre el Plan de gestión del distrito de cuenca fluvial de Cataluña, el CADS recomienda buscar soluciones adecuadas de bajo coste y bajo impacto ambiental para pequeños núcleos.

La contribución relativa de los efluentes de aguas residuales sin tratar sobre el caudal de los arroyos receptores es muy variable durante el año, siendo muy importante durante los momentos de sequía estival, ya que, en condiciones de caudales bajos, la dilución de los efluentes es mínima. Por tanto, el agua que circula por el río puede llegar a ser el 100% agua residual. La degradación de los ecosistemas acuáticos se atribuye principalmente al exceso de concentraciones de nutrientes de origen antropogénico. Esta degradación combinada con la escasez de agua que actualmente están sufriendo los ecosistemas acuáticos, es la principal causa de alarma del retroceso de los recursos hídricos a escala global.

En regiones del clima mediterráneo, estos efectos pueden ser más perjudiciales. El clima mediterráneo caracterizado por una alta variabilidad en las precipitaciones, provoca que el régimen hidrológico de los ríos de esta región esté sometido a condiciones extremas de sequías y riadas. Esta variabilidad se ve alterada de forma importante por el cambio global, aumentando así los

episodios de sequía en magnitud y duración. Por lo tanto, los ecosistemas fluviales de la región mediterránea están sufriendo alteraciones importantes que afectan a su conservación y biodiversidad autóctona, rompiendo la heterogeneidad y conectividad de los diferentes hábitats; por lo tanto, alterando gravemente su estructura y funcionamiento (DMA, 2000/60/CE).

Los sistemas de depuración natural basados en las denominadas “Nature Based Solutions” (NBS) son una herramienta muy importante y fundamental para reducir esta problemática, que abordan diversos retos sociales preservando la sostenibilidad de los ecosistemas. Los sistemas de depuración de aguas residuales naturales más eficientes se basan en gravas, pero éstas se tienen que extraer y transportar; por tanto, tienen un alto coste económico y generan una huella de carbono muy importante. Siguiendo la línea de investigación de los últimos 9 años en el URL, se han buscado alternativas al uso de gravas. En este estudio se quiere evaluar la capacidad de retención de nitrógeno y fósforo de diferentes configuraciones de sistemas de depuración de aguas residuales utilizando materiales de Km0 de origen vegetal, así como residuos de procesos industriales para mejorar la calidad de estas aguas antes de ser vertidas a medio natural.

## 1.2 Metodología

El experimento se llevó a cabo en las instalaciones del Urban River Lab (URL; [www.urbanriverlab.com](http://www.urbanriverlab.com)), un laboratorio al aire libre formado por 12 canales de hormigón de 12 metros de largo, 60 cm de ancho y 40 cm de profundidad alimentados por agua residual tratada del efluente de la depuradora de Montornés del Vallès. Los 3 primeros metros de cada canal se llenaron con materiales vegetales o residuos industriales y se fijó el caudal de agua de entrada a  $2 \text{ L min}^{-1}$ . Más concretamente, se testaron 4 configuraciones diferentes, denominadas tratamientos, y cada tratamiento se aplicó a 3 canales diferentes que sirvieron como réplicas (4 tratamientos X 3 réplicas = 12 canales). Los tratamientos fueron:

- **Tratamiento 1:** Sacos de café de yute/coco (Fig. 1a).
- **Tratamiento 2:** Sacos de café de yute/coco plantados con 3 especies de helófitos: *Scirpus lacustris*, *Iris pseudacorus*, *Carex pendula* (Fig. 1b).
- **Tratamiento 3:** Ramas de más de 3mm de diámetro de *Castanea sativa* de 10cm de largo (Fig. 1c).
- **Tratamiento 4:** Sacos de café de yute/coco, llenos de hojas de *Platanus hispanica* (Fig. 1d).

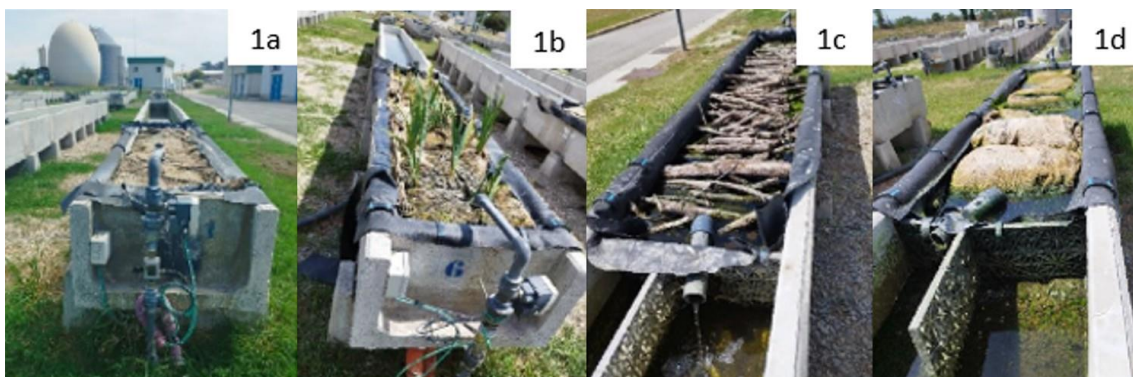


Figura 1: Tratamientos utilizados para evaluar su capacidad de retención de nutrientes en aguas residuales sin depurar.

La capacidad de retención de nutrientes de los 4 tratamientos se testó en 2 condiciones experimentales diferentes:

- A: En condiciones basales: con agua residual tratada procedente del efluente de la EDAR.
- B: En condiciones enriquecidas: añadiendo agua residual sin tratar para aumentar 3 veces las concentraciones basales de materia orgánica y nutrientes.

Para alcanzar las condiciones enriquecidas se llenaron 4 bidones de 1000 L con agua del decantador primario de la misma EDAR y se inyectó en el inicio de los canales a un flujo constante, utilizando bombas peristálticas, durante 48 horas.

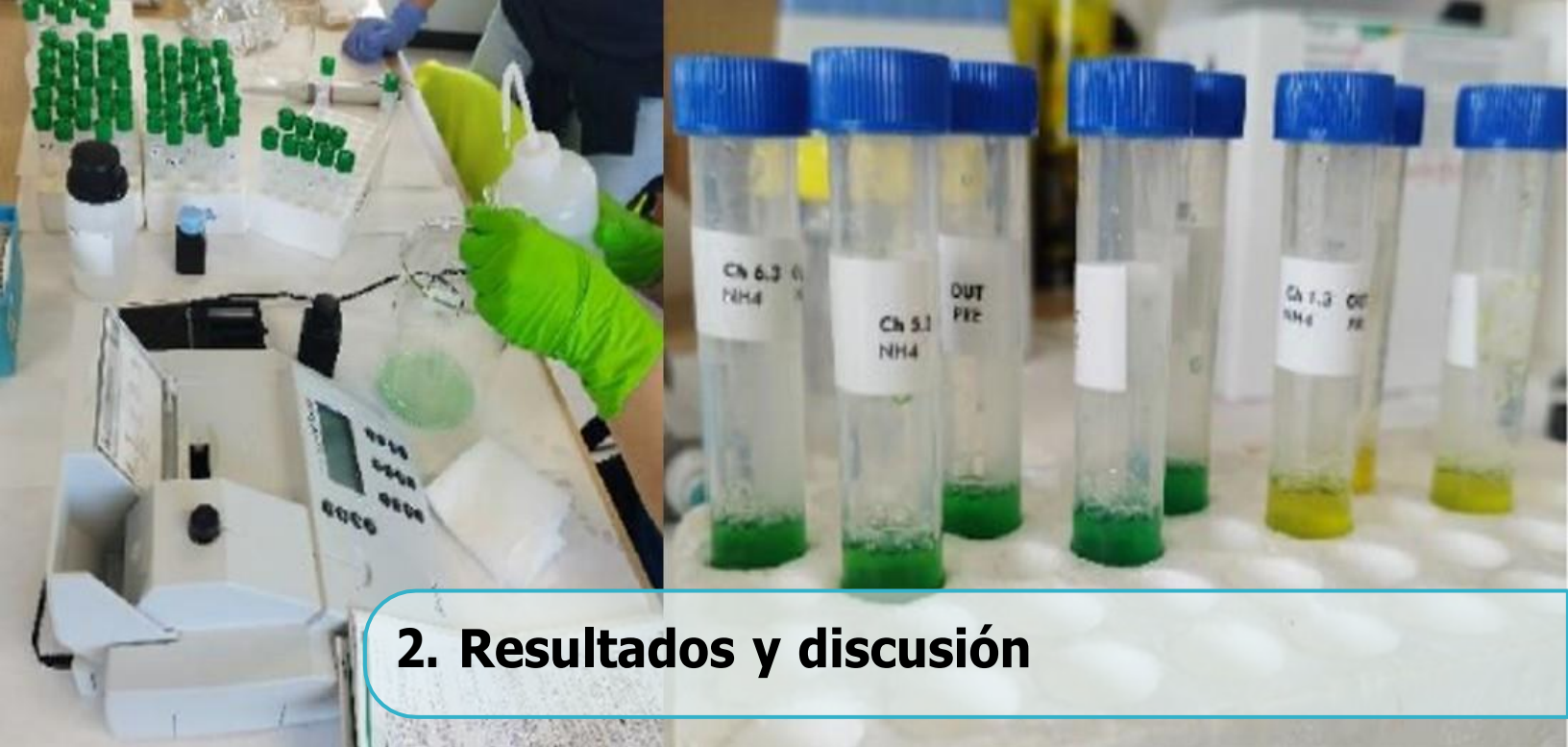
Se realizaron un total de 4 muestreos para poder evaluar la capacidad de retención de nutrientes de los tratamientos en diferentes condiciones temporales y experimentales. A lo largo del 2023 se realizó un primer muestreo para medir la capacidad de retención de nutrientes en condiciones basales (BASAL 1). En julio del 2023 se hizo otra medida en condiciones basales (BASAL2) y seguidamente, se llevó a cabo otra medida en condiciones enriquecidas experimentalmente (ENRIQUECIDO 1). En setiembre del 2023 se hizo un último muestreo en condiciones basales (BASAL 3). Las condiciones basales, aunque no corresponden a las características de agua residual no tratada que es la que recibirían en caso de implementarse en sistemas de depuración, nos permite comparar el funcionamiento de los diferentes tratamientos en diferentes estadios de desarrollo. Las condiciones experimentales (ENRIQUECIDO) nos permiten evaluar la respuesta funcional de cada tratamiento frente a la aplicación de agua residual no tratada.

Para evaluar la capacidad de retención de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) y fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) de los 4 tratamientos, se cogieron muestras de agua en el inicio de cada canal y al final del tramo del canal donde estaban depositados los sustratos de los diferentes tratamientos (3 m aguas abajo del inicio de los canales). Las muestras del final del tratamiento se cogían más tarde que las muestras en el inicio del canal. La diferencia de tiempo entre la recogida de muestras en el inicio y al final del tramo correspondía al tiempo promedio de transporte del agua entre estos dos puntos (Nominal Travel Time, NTT). El NTT se determinó en los 12 canales antes de realizar cada uno de los 4 muestreos utilizando adiciones puntuales de sal ( $\text{NaCl}$ , como trazador hidrológico) en el inicio del canal y midiendo la conductividad al final de los tratamientos (3 m aguas abajo del inicio de los canales) con un conductímetro. Para cada muestreo y en cada canal se repitió la recogida de muestras en el inicio del canal y al final del tratamiento en tres horas consecutivas. Las muestras se filtraron con filtro de fibra de vidrio de 0.7  $\mu\text{m}$  en viales y se analizó la concentración de  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{PO}_4^{3-}$  con un espectrofotómetro de campo (NOVA60; Merck), de acuerdo con el protocolo establecido para cada nutriente. La capacidad de retención de  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{PO}_4^{3-}$  en cada canal se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Retención} = \frac{(\text{Conc IN}) - (\text{Conc OUT})}{\text{Conc IN}} \times 100$$

dónde Conc IN y Conc OUT son las concentraciones de nutrientes en el inicio y al final del tratamiento, respectivamente.

Valores positivos indican una disminución de la concentración del nutriente al final del tratamiento; por tanto, una retención neta del nutriente. En cambio, valores negativos indican un aumento de la concentración del nutriente al final del tratamiento; por tanto, una liberación neta del nutriente.



## 2. Resultados y discusión

### 2.1 Resultados y discusión

En la figura 2, se puede observar que en el muestreo Basal 1, en todos los tratamientos se liberó  $\text{NH}_4^+$  en mayor o menor medida, es decir, los valores de retención fueron negativos. Los tratamientos con sacos y sacos con plantas liberaron más  $\text{NH}_4^+$  (aproximadamente,  $R = -55\%$ ) que los tratamientos de sacos con hojas y en los troncos liberaban menos  $\text{NH}_4^+$  ( $-18.5\%$  y  $-3.7\%$ , respectivamente). En el muestreo Basal 2, la liberación de  $\text{NH}_4^+$  disminuye en los sacos ( $-25.09\%$ ) y se produce retención limpia en el resto de tratamientos, con porcentajes de retención positiva más elevados para troncos, seguido de los sacos con hojas y, finalmente de los sacos con planta ( $37.7\%$ ,  $33.6\%$  y  $12.0\%$ , respectivamente). Finalmente, en el muestreo Basal 3, realizado 2 meses más tarde del primero (Basal 1) al final del verano, se pudo observar que los tratamientos volvían a liberar  $\text{NH}_4^+$  como en el muestreo inicial (sacos con plantas =  $-34.21\%$ ; troncos =  $-9.77\%$ ; y sacos con hojas =  $-8.13\%$ ). El tratamiento con sacos fue la excepción dado que mantuvo una retención neta, aunque con un porcentaje inferior al obtenido durante el muestreo Basal 2 (Fig. 2). Durante la adición residual no tratada hubo retención neta de  $\text{NH}_4^+$  en todos los tratamientos, con valores más altos en los tratamientos sacos y sacos con planta ( $38.30\%$  y  $32.29\%$ , respectivamente). Los valores de retención neta fueron más bajos en los tratamientos de sacos con hojas ( $10.38\%$ ) y de troncos ( $5.89\%$ ). Los mecanismos principales asociados a la retención de  $\text{NH}_4^+$  son la nitrificación (oxidación microbiana de  $\text{NH}_4^+$  a  $\text{NO}_3^-$ ) y la asimilación biológica por parte de plantas y microorganismos (incorporación del nitrógeno en tejidos). Teniendo en cuenta que el agua residual produce un incremento de materia orgánica disuelta y compuestos reducidos, posiblemente el incremento de retención de  $\text{NH}_4^+$  fue asociado a un incremento de la asimilación de este elemento por parte de los microorganismos. Si se comparan estos resultados con los de los muestreos basales 1, 2 y 3 se observan diferencias importantes. En base a estos resultados, se observa que estos tratamientos, tienen capacidad de retener  $\text{NH}_4^+$ , pero esta capacidad presenta un momento óptimo durante las condiciones de verano. Además, durante este período, esta capacidad se ve favorecida por la disponibilidad de materia orgánica asociada a las aguas residuales no tratadas.

En el caso del  $\text{PO}_4^{3-}$ , los resultados fueron más erráticos que los del  $\text{NH}_4^+$  (Fig. 2). Durante el

muestreo inicial (Basal 1), contrariamente a lo que se observó para el  $\text{NH}_4^+$ , la retención de P fue neta (valores positivos) en sacos, sacos con planta y troncos (4.41%, 17.12% y 2.63% respectivamente); en cambio, se produjo liberación en los sacos con hojas (-10.39%). En el muestreo Basal 2 (60 días después), los porcentajes de retención neta aumentaron en todos los casos respecto al Basal 1, excepto en los sacos con planta que disminuyó (5.41%). En el muestreo final basal (Basal 3) se observa un porcentaje de liberación de  $\text{PO}_4^{3-}$  considerable en sacos con hojas (-45.35%). En los tratamientos de troncos y sacos con planta también hay liberación de  $\text{PO}_4^{3-}$ , pero en menor medida (-18.97% y -5.95%, respectivamente). En el caso de los sacos, se observa un porcentaje muy alto de retención de  $\text{PO}_4^{3-}$  (80.75%) (Fig.2).

Contrariamente a lo que pasa con el  $\text{NH}_4^+$ , durante la adición de agua residual no tratada se observa una liberación de  $\text{PO}_4^{3-}$ . Esta respuesta contrasta con los valores positivos (retención neta de  $\text{PO}_4^{3-}$ ) medidos justamente antes del enriquecimiento (Basal 2). La liberación más elevada se observó en el tratamiento de troncos (-14.99%) seguido de los sacos con planta (-10.44%) y, con valores más bajos, en sacos con hojas y sacos sin nada (-8.71% y -1.61% respectivamente). El aumento de la concentración de  $\text{PO}_4^{3-}$  durante el enriquecimiento podría ser debida a una redisolución de P retenido favorecida por un incremento de actividad metabólica asociado al incremento de materia orgánica durante la adición.

La retención de nutrientes en ecosistemas con vegetación acuática está regulada por la asimilación de N y P en los tejidos de las plantas. Aunque el nivel de retención de nutrientes de estos sistemas depende de la tasa de crecimiento, la madurez y la fisiología de las plantas, y de la disponibilidad de nutrientes (Nikolakopoulou, 2020). Ahora bien, las comunidades microbianas que se desarrollan en las raíces de las plantas (la denominada rizosfera) también contribuye a asimilar, transformar y retener el N y P. Algunos estudios además muestran que la actividad de los microorganismos juega un papel mucho más relevante que las plantas en la retención de nutrientes del ecosistema. Los resultados del presente estudio también van en esta dirección, mostrando que estos tratamientos donde sólo hay comunidades microbianas asumen capacidades de retención de nutrientes similares o superiores en el tratamiento de sacos con plantas. El caso de la respuesta del tratamiento sólo con sacos es un buen ejemplo, teniendo en cuenta que es el tratamiento que mantiene capacidad de retención tanto de N como de P al final del experimento, después de 5 meses de tratamiento. Esta retención está asociada a las comunidades de microorganismos que se desarrollan en el entramado de las fibras del saco.

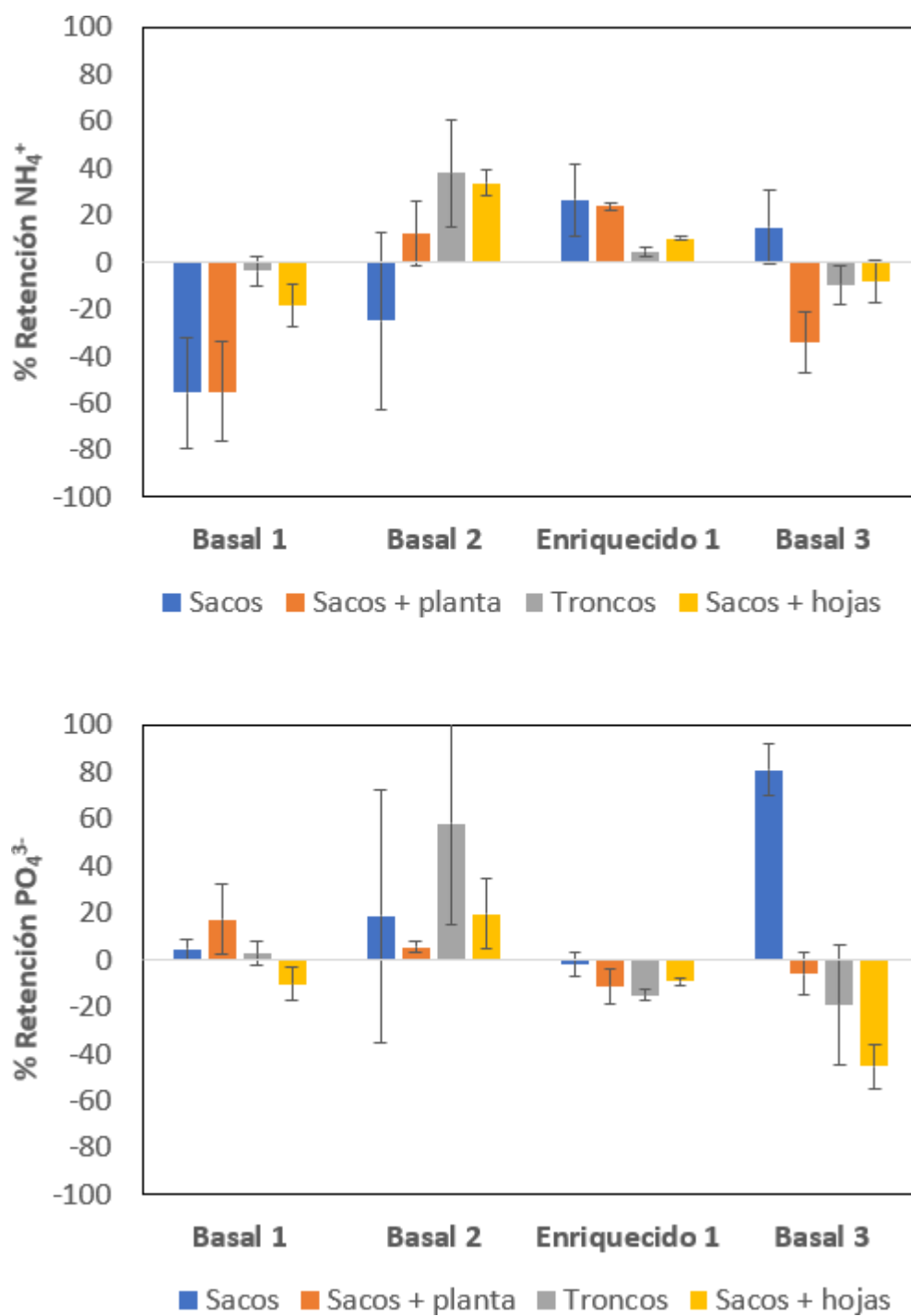


Figure 2: Porcentaje de retención de  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{PO}_4^{3-}$  con diferentes tratamientos (Fig.1) en diferentes condiciones (Basal 1, Basal 2, Enriquecido 1 y Basal 3).



### 3. Conclusiones

#### 3.1 Conclusiones

Con los resultados obtenidos en este proyecto, se puede concluir que es viable la utilización de residuos generados en la industria alimentaria (sacos de café) o de materia orgánica detrítica de Km0 (restos de poda de castaño) en el diseño de sistemas de depuración de aguas residuales. Estas estrategias se basan en productos naturales y son más sostenibles. Pero, hay que tener en cuenta que estas estrategias pueden ser factibles en condiciones de caudales de aguas residuales relativamente pequeños. Por tanto, pueden ser una buena solución para el tratamiento de aguas residuales en casas aisladas o pequeños núcleos urbanos.

Hay que indicar que los resultados sugieren que la capacidad de retener nutrientes de estos sistemas, sobre todo amonio, parece estar maximizada en momentos de condiciones ambientales óptimas (veranos con buenas temperaturas) para la actividad de las plantas y los microorganismos. Esto también podría estar explicado por el hecho que es necesario un tiempo determinado para que la planta se adapte al sistema y que las comunidades microbianas se desarrollen. No obstante, parece que esta capacidad se pierde con el tiempo y podría coincidir con el hecho que los procesos de mineralización de la materia orgánica de la malla del saco o de los troncos es más importante que el proceso de asimilación y, por tanto, el resultado neto es una liberación de nutrientes a la columna de agua. En este sentido, dado que cada tratamiento mostró una dinámica temporal diferenciada en la retención de nutrientes y también una respuesta diferente en la adición de agua residual no tratada, sería interesante desarrollar sistemas de depuración que combinen de manera secuenciada estos tratamientos per evaluar si su funcionamiento se complementa e incrementa la retención. Por ejemplo, la presencia de sacos con macrófitos emergentes puede facilitar la eliminación de nitrógeno vía asimilación, mientras que la disponibilidad de una fuente de carbono lábil en los sacos con hojas puede estimular la actividad microbiana y, por tanto, los procesos de la retención de N.

Es interesante indicar que hemos observado que la contribución de estos tratamientos a la retención de nutrientes difiere en función de los elementos que se estudia (N y P). En concreto, esto fue muy evidente en la respuesta en cuanto a la adición de agua residual no tratada, que incrementó la cantidad de materia orgánica disuelta. En este caso, mientras que los tratamientos incrementaban

la retención de N, también incrementaban la liberación de P. Estos resultados sugieren que es importante identificar el problema en relación a la calidad del agua del efluente antes de seleccionar un tratamiento de retención de nutrientes concreto. Sin embargo, es evidente que será necesario continuar investigando para encontrar estrategias que favorezcan la retención de P utilizando sistemas de tratamiento sostenibles.

Los sistemas artificiales de flujo subsuperficial basados en el uso de las estructuras utilizadas en este estudio pueden resultar efectivos no solo porque este tipo de sistemas mejora la calidad del agua oxidando el amonio, reduciendo nitratos y reteniendo el fósforo, sino que también pueden constituir una aportación de nuevos hábitats para el desarrollo de vida silvestre acuática y terrestre.

Este tipo de sistemas están en la línea de las estrategias con soluciones basadas en la naturaleza (NBS) y son una buena estrategia en la depuración de aguas residuales, sobre todo para pequeñas comunidades rurales que no pueden conectarse a los sistemas convencionales de depuradoras. Con la creación de lagunas artificiales utilizando los diversos tratamientos de este estudio y combinándolos secuencialmente se puede mejorar la calidad de las aguas residuales de estos pequeños núcleos antes de ser derivadas a los cauces fluviales. Se puede concluir que, además de utilizar una tecnología más económica y sostenible, su mantenimiento es más sencillo. Por tanto, con un buen conocimiento de la dinámica de funcionamiento de estos tratamientos y una buena gestión temporal se puede conseguir una buena eficiencia en el tratamiento secundario de las aguas residuales de pequeños núcleos y casas aisladas.



## 4. Referencias

### 4.1 Referencias

1. Ávila Díaz, J. A., Arciniega Gavaliz, M. A. and Hernández Sandoval, P., 2022. Depuración de aguas residuales domésticas mediante un sistema de humedal artificial con Canna indica como alternativa sostenible que contribuye al objetivo 6 (agua limpia y saneamiento) de los ODS. En: Aportes a los objetivos del Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030. Sinaloa: Astra Ediciones S.A. de C.V., p. 248.
2. Georgia Nikolakopoulou, N., 2020. The functional pole of emergent macrophytes in nature-based solutions (NBS) aiming to mitigate nutrient loading in freshwater ecosystems. Barcelona: Universitat de Barcelona.
3. Informe del CAD5 3/2016. Objectiu 6: Garantir la disponibilitat i una gestió sostenible de l'aigua i el sanejament per a totes les persones.



## 5. Equipo de trabajo

### 5.1 Personal

Este trabajo ha sido realizado por:

- Sara Castelar, Centro de Estudios Avanzados de Blanes (CEAB-CSIC).
- Miquel Ribot, Centro de Estudios Avanzados de Blanes (CEAB-CSIC).
- Eugènia Martí, Centro de Estudios Avanzados de Blanes (CEAB-CSIC).
- Esperança Gacia, Centro de Estudios Avanzados de Blanes (CEAB-CSIC).
- Albert Sorolla, Naturalea Conservación
- Gabriela Pucuji, Naturalea Conservación
- Manel Isnard, Consorci Besòs-Tordera
- Toni Mas, Consorci Besòs-Tordera
- Martina Contini, Consorci Besòs-Tordera
- Francesc Sabater, Universidad de Barcelona (UB)
- Ana Febrero, Universidad de Barcelona (UB)
- Jordi Bort, Universidad de Barcelona (UB)

### 5.2 Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado por Naturalea S.L. con el soporte del Centro de Estudios Avanzados de Blanes, el Consorci Besòs-Tordera, la Universidad de Barcelona y Cafés Novell; y ha formado parte del Trabajo Final de Máster de la Gabriela Pucuji.

### 5.3 Entidades promotoras

