

## **SIMBIOSIS URBANA-INDUSTRIAL PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS Y AGUA REGENERADA EN EL ÁREA DE ALCOY: PROYECTO SYMSITES**

Magdalena, J.A.<sup>1</sup>, Tamarit, R<sup>2</sup>, E. Zuriaga<sup>2</sup>

<sup>1</sup>FOMENTO VALENCIA MEDIOAMBIENTE SL. (FOVASA) Avenida Alquería de Moret, 5. 46210, Picanya, Spain

<sup>2</sup>FACSA, SOCIEDAD DE FOMENTO AGRÍCOLA CASTELLONENSE, S.A., Avda Castell Vell 35. 12004, Castelló de la Plana, España

Email: [josea.magdalena@nealis.com](mailto:josea.magdalena@nealis.com)

### **I. RESUMEN**

La gestión integrada de aguas residuales y residuos orgánicos urbanos e industriales constituye una oportunidad para avanzar hacia modelos más sostenibles y circulares. En este contexto, **el proyecto SYMSITES** aborda la implementación de la simbiosis urbano-industrial (S-UI) como estrategia para la valorización de estos residuos, promoviendo la recuperación de agua y energía en entornos regionales. **El objetivo principal del proyecto es desarrollar y validar soluciones tecnológicas avanzadas que permitan el tratamiento conjunto de aguas residuales urbanas e industriales con biorresiduos**, facilitando la generación de recursos de alto valor añadido como biogás, agua regenerada y productos derivados. En el EcoSite español, ubicado en la EDAR de Alcoy, se ha implementado una planta piloto basada en un biorreactor anaerobio de membranas (AnMBR) de 2 m<sup>3</sup>, donde se combinan corrientes procedentes de aguas residuales urbanas, industriales (principalmente de los sectores textil y cosmético) y residuos orgánicos. Los resultados obtenidos evidencian una elevada eficiencia en la eliminación de materia orgánica y sólidos en suspensión, alcanzando altas reducciones en DQO y bajas concentraciones de sólidos, cumpliendo con los requisitos normativos para la reutilización del agua tratada. Asimismo, se ha observado una notable capacidad de desinfección microbiológica, con reducciones significativas de bacterias y protozoos, así como una eliminación relevante de contaminantes emergentes. Además de la producción de agua regenerada, el proceso permite la generación de biogás a partir de la digestión anaerobia de la materia orgánica, contribuyendo a la recuperación energética y a la reducción de emisiones asociadas al tratamiento convencional. En conjunto, los resultados del proyecto SYMSITES demuestran el potencial de la S-UI como un enfoque viable para optimizar la gestión de residuos y aguas residuales, impulsando la transición hacia sistemas más eficientes, resilientes y alineados con los principios de la economía circular.

## II. PALABRAS CLAVE

Agua regenerada, biogás, contaminantes emergentes, simbiosis urbana-industrial, valorización de residuos.

## III. INTRODUCCIÓN

La creciente complejidad en la gestión de aguas residuales, residuos orgánicos urbanos y efluentes industriales representa un desafío significativo para el desarrollo de sistemas de tratamiento sostenibles. La coexistencia de múltiples corrientes con elevada variabilidad en carga orgánica, composición química y presencia de contaminantes emergentes limita la eficiencia de las infraestructuras convencionales, diseñadas tradicionalmente para flujos homogéneos. En este contexto, la necesidad de avanzar hacia modelos integrados que permitan la valorización conjunta de estos residuos es coherente con las estrategias europeas orientadas a la descarbonización, la eficiencia en el uso de recursos y la implementación de la economía circular.

La S-UI surge como un enfoque innovador que promueve la integración de flujos de residuos y subproductos entre sectores urbanos e industriales, favoreciendo su transformación en recursos útiles mediante esquemas de tratamiento combinados. El proyecto SYMSITES se enmarca en esta aproximación, con el objetivo de desarrollar y validar soluciones tecnológicas y modelos de gestión que permitan la implementación de sistemas de S-UI a escala regional. En particular, el proyecto propone la integración de tecnologías avanzadas para el tratamiento conjunto de aguas residuales y biorresiduos, incluyendo un biorreactor anaerobio de membranas (AnMBR), y posteriores sistemas de tratamiento y procesos de valorización termoquímica de residuos no reciclables como la adsorción y la pirólisis, respectivamente.

En el caso del EcoSite español, situado en la EDAR de Alcoy, el enfoque se centra en el tratamiento combinado de aguas residuales urbanas e industriales con la fracción orgánica de residuos municipales, integrados en un sistema AnMBR a escala piloto. Este sistema incorpora un digestor anaerobio acoplado a módulos de membrana, donde se han empleado membranas comerciales de ultrafiltración y membranas de microfiltración con sistemas de vibración magnética para el control del ensuciamiento. **La configuración del proceso permite simultanear la degradación anaerobia de la materia orgánica con la separación sólido-líquido, favoreciendo i) la producción de biogás y la ii) obtención de un efluente de alta calidad susceptible de reutilización según el RD1085/2024.**

Adicionalmente, el proyecto contempla la integración de etapas posteriores de tratamiento del agua regenerada, incluyendo tecnologías de adsorción mediante biochar derivado de residuos industriales, o el uso de contactores de membrana para la recuperación de nutrientes. En conjunto, el enfoque adoptado en SYMSITES permite abordar de manera integrada la gestión de residuos y aguas residuales, promoviendo la recuperación de recursos y la reducción del impacto ambiental asociado, en línea con los objetivos de sostenibilidad de la Unión Europea.

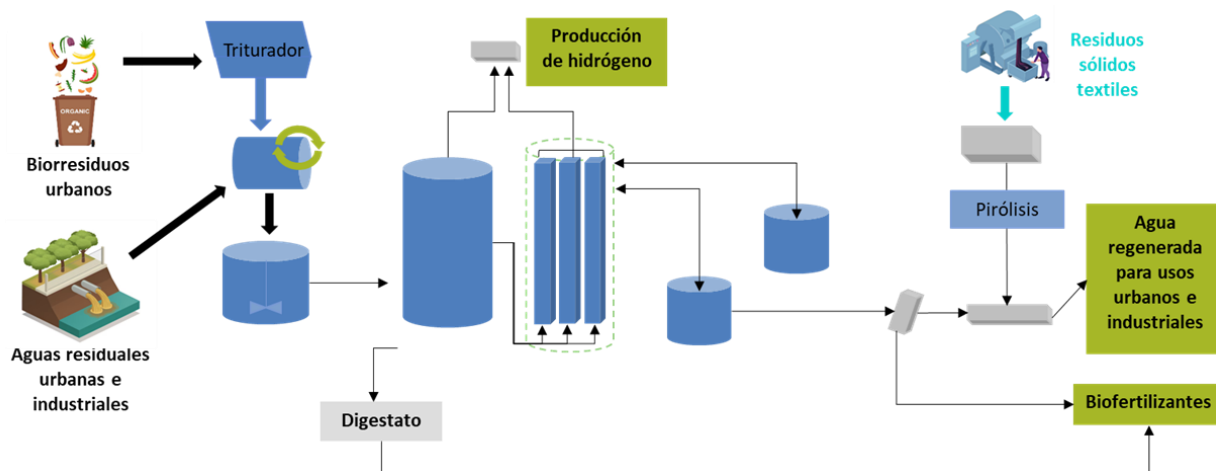
#### IV. MATERIALES Y METODOS

La metodología empleada se estructuró en tres etapas principales: i) diseño, construcción y puesta en marcha y operación del sistema piloto, ii) evaluación del rendimiento del tratamiento anaerobio y de los procesos de separación por membranas, y iii) análisis de la calidad del efluente y de los recursos generados.

En la primera etapa, se analizó la composición del inóculo y de la alimentación, así como la evolución de los parámetros operativos, realizando ajustes progresivos en las condiciones de operación para garantizar la estabilidad del sistema. En la fase de operación, se evaluaron los distintos flujos de tratamiento integrados en el sistema, incluyendo la digestión anaerobia para la producción de biogás, la separación sólido-líquido mediante módulos de membrana y la producción de agua regenerada. Se estudiaron las condiciones de operación del sistema y su influencia sobre la producción de biogás, la generación de lodos y la calidad del permeado obtenido. Finalmente, se realizaron análisis específicos para evaluar la calidad del efluente tratado, incluyendo la determinación de contaminantes emergentes y patógenos, así como el estudio de tecnologías complementarias para la recuperación de nutrientes a partir del efluente, como el uso de contactores de membrana para la recuperación de nitrógeno.



**Figura 1.** Planta piloto correspondiente al EcoSite español situado en la EDAR de Alcoy.



**Figura 2.** Tecnologías involucradas en el tren de tratamiento del EcoSite español: AnMBR, contactores de membrana, columnas de adsorción y pirólisis.

## V. RESULTADOS

### Proceso AnMBR: tratamiento anaerobio del agua residual y la fracción orgánica

La operación del piloto AnMBR en el EcoSite español confirmó la capacidad de convertir la materia orgánica de una alimentación mixta en un vector energético estable. Durante la fase de optimización se incrementó la carga orgánica (OLR) para mejorar la metanogénesis y alcanzar las condiciones necesarias para la operación continua, logrando biogás con alto contenido en metano (~75 % mol) y un CO<sub>2</sub> ~23 % mol, con H<sub>2</sub>S ~0,08 % mol y siloxanos por debajo del límite de detección reportado, lo que resulta una composición favorable para su valorización posterior. En condiciones de operación con membranas comerciales, el sistema trabajó a temperatura ambiente (~24–25 °C) y pH cercano a la neutralidad manteniendo un rendimiento robusto, alcanzando elevadas eliminaciones de materia orgánica (~95 %).

Los resultados recopilados en la bibliografía muestran que los reactores AnMBR, tanto en configuración externa como sumergida, permiten alcanzar elevadas eficiencias de eliminación de materia orgánica en el tratamiento de aguas residuales, generalmente en el rango del 87–95 % de eliminación de DQO (Martínez-Sosa et al., 2011; Giménez et al., 2014; Peña et al., 2019; Lim et al., 2019; Ji et al., 2020; Kong et al., 2021; Robles et al., 2022). Las condiciones de operación varían ampliamente, con tiempos de retención hidráulica entre 6 y 48 h y temperaturas entre 10 y 35 °C, observándose un buen rendimiento incluso a temperaturas relativamente bajas. En términos de producción energética, los rendimientos de metano se sitúan típicamente entre 0,07 y 0,30 L CH<sub>4</sub>/g DQO, con contenidos de metano en el biogás del orden del 72–78 % (v/v), lo que confirma el potencial de estos sistemas para la recuperación de energía.

Además, varios estudios destacan la elevada calidad del efluente obtenido (DQO < 80 mg/L e incluso valores cercanos a 15 mg/L), así como reducciones significativas de patógenos. Factores operacionales como la carga orgánica, la relación DQO/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> o el tamaño de poro de las membranas influyen en el rendimiento del proceso, junto con parámetros de diseño como el SRT

o el flujo de membrana. En cuanto a los lodos generados en la línea anaerobia, el sistema muestra una capacidad de reducción de lodos en torno al 80 %, lo que evidencia su potencial para disminuir de forma significativa la producción de fangos frente a esquemas convencionales y, por tanto, la carga asociada a su gestión.

### Calidad del agua regenerada obtenida

El proceso permite obtener un efluente con baja carga orgánica y sólidos, manteniendo operación estable sin episodios relevantes de ensuciamiento irreversible durante el periodo evaluado (>1.5 años). Desde la perspectiva de cumplimiento de parámetros de vertido se obtuvo una eficiencia de eliminación de DQO del ~95 % (y la DBO<sub>5</sub> alcanzó >99 %), mientras que los SST quedaron holgadamente por debajo del límite (con una concentración inferior a 10 ppm). No obstante, para nutrientes (N y P) el efluente tratado presentó concentraciones que requieren un tratamiento terciario para que su vertido sea autorizado, aunque esta eliminación podría no ser necesaria en caso de que el uso final de esta corriente de agua fuera el riego agrícola.

Además, se confirmó la eficiencia del proceso SYMSITES frente a **contaminantes emergentes** como los presentes en la lista de vigilancia/prioridad o los descritos en la Directiva UE 2024/3019. No obstante, la eficiencia de eliminación de estos compuestos se vio mejorada por el uso de tratamientos terciarios complementarios basados en adsorción, demostrando estos un refuerzo en la capacidad global de eliminación. En relación con el **control microbiológico**, el sistema proporcionó un efluente con bajas concentraciones de indicadores bacterianos y una elevada estabilidad operativa. Asimismo, se observó una reducción significativa de patógenos, en línea con los niveles esperados para tratamientos avanzados. En el caso de los indicadores virales, el proceso presentó una capacidad de eliminación más limitada en comparación con los contaminantes bacterianos.



**Figura 3.** Agua regenerada obtenida tras SYMSITES

En conjunto, la línea de tratamiento de agua regenerada basada en SYMSITES mostró un alto rendimiento en la eliminación de materia orgánica y sólidos, un control microbiológico robusto y una capacidad relevante de reducción de contaminantes emergentes, que puede optimizarse mediante la incorporación de etapas adicionales de postratamiento cuando se requiere cumplir con criterios regulatorios o usos del agua regenerada más específicos.

## **VI. CONCLUSIONES**

Los ensayos desarrollados a escala de planta piloto en el EcoSite español han permitido validar la viabilidad técnica de un sistema integrado basado en la S-UI, combinando el tratamiento de aguas residuales urbanas e industriales con la valorización de residuos orgánicos mediante un AnMBR. Los resultados obtenidos confirman que la tecnología puede operar de forma estable en condiciones reales, permitiendo la producción simultánea de biogás, agua regenerada y lodos con potencial aplicación fertilizante, y demostrando su potencial para la recuperación de recursos y el cierre de ciclos en el ámbito urbano-industrial.

Asimismo, la validación en planta piloto ha evidenciado una elevada eficiencia en la eliminación de materia orgánica, sólidos en suspensión y patógenos, así como una reducción significativa de contaminantes emergentes en el efluente tratado. La integración de procesos de separación mediante membranas y el análisis de tecnologías complementarias para la recuperación de nutrientes refuerzan la viabilidad del sistema como alternativa avanzada frente a los tratamientos convencionales. En conjunto, los resultados ponen de manifiesto el potencial de este tipo de soluciones para mejorar el rendimiento ambiental y favorecer modelos de gestión del agua más sostenibles, resilientes y alineados con los principios de la economía circular.

## AGRADECIMIENTOS

El proyecto SYMSITES está financiado por la Unión Europea dentro del programa HORIZON-CL4-2021-TWIN-TRANSITION-01 (Acuerdo de subvención 101058426). Los autores también desean agradecer al resto de socios del proyecto (<https://symsites.eu/consortium/>) y a la Entidad Pública de Saneamiento de Aguas Residuales de la Comunidad Valenciana (EPSAR) por ceder el espacio de sus instalaciones en la EDAR de Alcoy.



## VII. REFERENCIAS

1. Ji, J., Sakuma, S., Ni, J., Chen, Y., Hu, Y., Ohtsu, A., ... & Li, Y. Y. (2020). Application of two anaerobic membrane bioreactors with different pore size membranes for municipal wastewater treatment. *Science of the Total Environment*, 745, 140903.
2. Martinez-Sosa, D., Helmreich, B., Netter, T., Paris, S., Bischof, F., & Horn, H. (2011). Anaerobic submerged membrane bioreactor (AnSMBR) for municipal wastewater treatment under mesophilic and psychrophilic temperature conditions. *Bioresource technology*, 102(22), 10377-10385.
3. Peña, M., do Nascimento, T., Gouveia, J., Escudero, J., Gómez, A., Letona, A., ... & Fdz-Polanco, F. (2019). Anaerobic submerged membrane bioreactor (AnSMBR) treating municipal wastewater at ambient temperature: Operation and potential use for agricultural irrigation. *Bioresource technology*, 282, 285-293.
4. Lim, K., Evans, P. J., & Parameswaran, P. (2019). Long-term performance of a pilot-scale gas-sparged anaerobic membrane bioreactor under ambient temperatures for holistic wastewater treatment. *Environmental science & technology*, 53(13), 7347-7354.

5. Giménez, J. B., Martí, N., Robles, A., Ferrer, J., & Seco, A. (2014). Anaerobic treatment of urban wastewater in membrane bioreactors: evaluation of seasonal temperature variations. *Water science and technology*, 69(7), 1581-1588.
6. Kong, Z., Li, L., Wu, J., Wang, T., Rong, C., Luo, Z., ... & Li, Y. Y. (2021). Evaluation of bio-energy recovery from the anaerobic treatment of municipal wastewater by a pilot-scale submerged anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) at ambient temperature. *Bioresource Technology*, 339, 125551.
7. Robles, Á., Jiménez-Benítez, A., Giménez, J. B., Durán, F., Ribes, J., Serralta, J., ... & Seco, A. (2022). A semi-industrial scale AnMBR for municipal wastewater treatment at ambient temperature: performance of the biological process. *Water Research*, 215, 118249.