

RECUPERACIÓN DE NUTRIENTES Y VALORIZACIÓN DE FANGOS DE DEPURADORA: PROYECTO FERTILAB

Sánchez Ramírez, J.E¹; Zuriaga Agusti, E¹; Santateresa Forcada, E¹, García Ventoso, M; Querol Rodríguez, S; Beltrán Pitarch, I²; Badenes Catalán, C²; Molina Peñate, Esther³; Moral Herrero, R⁴; Cerrillo Moreno, M⁵; Izquierdo Figarola, J⁶; Pardo Nieva, G⁷

¹Sociedad de Fomento Agrícola Castellonense, S.A.U (FACSA)

²Ayuntamiento de Castellón de la Plana

³Grup d'Investigació en Compostatge (GICOM). Universitat Autònoma de Barcelona

⁴Grupo GIAAMA. Univ. Miguel Hernández

⁵Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentaris (IRTA)

⁶Dept d'Enginyeria Agroalimentària i Biotecnologia, Univ. Politècnica de Catalunya

⁷Basque Centre for Climate Change – BC3

Email: javieredu.sanchez@nealis.com

I. RESUMEN

La gestión de los fangos generados en las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) constituye uno de los principales retos del sector, tanto por su creciente volumen como por los costes económicos y ambientales asociados a su tratamiento y disposición final. En este contexto, el **proyecto FERTILAB** aborda la valorización integral de los fangos de EDAR desde una perspectiva de economía circular, orientada a la recuperación de nutrientes y a la obtención de subproductos de alto valor añadido para su aplicación agrícola. **El objetivo principal del proyecto es transformar los fangos de EDAR en fertilizantes minerales, bioplaguicidas y bioestimulantes**, mediante la combinación de procesos físico-químicos y biotecnológicos. Durante el proyecto se llevaron a cabo ensayos a escala de laboratorio y planta piloto, destacando la recuperación de nitrógeno y fósforo en forma de estruvita ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$) mediante una planta piloto instalada por FACSA en la EDAR de Castellón. Dicha planta está compuesta por dos reactores de cristalización de 220 L que opera en discontinuo en 4 fases: acidificación, decantación, recuperación del sobrenadante y cristalización a pH 9. Los resultados muestran que la solubilización previa del fósforo, tanto por vías biológicas como químicas, facilita su recuperación como estruvita, obteniéndose cristales con elevado contenido en nutrientes, si bien con un contenido orgánico significativo que requiere optimización en la etapa de separación. También, se han desarrollado bioproductos mediante fermentación en estado sólido (FES), empleando fangos acondicionados como sustrato. Se han obtenido bioplaguicidas a partir de cepas de *Bacillus thuringiensis* y *Trichoderma harzianum*, así como bioestimulantes basados en la producción de ácido indol-3-acético (IAA) mediante hongos del género *Trichoderma*. Finalmente, se ha realizado un análisis de viabilidad técnica y económica que confirma el potencial de estas soluciones para una gestión más sostenible y eficiente de los fangos de EDAR.

II. PALABRAS CLAVE

Fangos de EDAR, estruvita, biopesticidas, bioestimulantes, fertilizantes.

III. INTRODUCCIÓN

La creciente generación de fangos en EDAR representa uno de los principales retos del ciclo urbano del agua. En la Unión Europea se producen más de 10 millones de toneladas anuales de materia seca, con una tendencia que va en aumento debido al crecimiento de la población y a mayores exigencias de tratamiento. La gestión de estos fangos supone elevados costes operativos en una EDAR, lo que pone de manifiesto la necesidad de soluciones más sostenibles y eficientes. Tradicionalmente, su destino ha sido la aplicación agrícola, la incineración o el vertido, aunque estas opciones están cada vez más limitadas por normativas más estrictas, como el Reglamento (UE) 2019/1009 o la Directiva Marco de Residuos (2008/98/CE), debido a la presencia de contaminantes emergentes, metales pesados, patógenos y su contribución a emisiones de gases de efecto invernadero.

En este contexto, la transición hacia un modelo de economía circular se ha convertido en una prioridad estratégica en la Unión Europea. Este enfoque promueve la valorización de los fangos como fuente de recursos, fomentando la recuperación de nutrientes, energía y compuestos de valor añadido. El fósforo, en particular, ha sido identificado como un recurso crítico por su carácter no renovable y la alta dependencia de importaciones, lo que impulsa el desarrollo de tecnologías para su recuperación en el tratamiento de aguas residuales. En este marco, el proyecto FERTILAB propone una valorización integral de fangos digeridos mediante su transformación en productos de alto valor añadido para la agricultura sostenible. El proyecto se estructura en tres líneas principales: **(i) la producción de fertilizantes minerales recuperados**, especialmente estruvita ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), mediante procesos de cristalización; **(ii) la obtención de biopesticidas mediante fermentación en estado sólido (FES)** con microorganismos funcionales; y **(iii) la generación de bioestimulantes** a partir de matrices orgánicas estabilizadas mediante FES.

La recuperación de fósforo en forma de estruvita destaca como una tecnología madura, capaz de alcanzar eficiencias superiores al 80–90% en condiciones óptimas, produciendo un fertilizante de liberación lenta y alta biodisponibilidad. Por su parte, la fermentación en estado sólido aplicada a fangos permite generar bioproductos con actividad biológica, como biopesticidas basados en *Bacillus thuringiensis* o bioestimulantes ricos en compuestos beneficiosos para el suelo y los cultivos. Este enfoque integrado no solo reduce el volumen y la peligrosidad de los fangos, sino que también impulsa nuevas cadenas de valor en el sector agroalimentario. Asimismo, contribuye a la mitigación del cambio climático al reducir emisiones y sustituir fertilizantes minerales convencionales. En conjunto, estas tecnologías posicionan los fangos de EDAR como un recurso estratégico dentro de un modelo de economía circular, promoviendo la sostenibilidad ambiental, económica y social del ciclo del agua.

IV. MATERIALES Y METODOS

La metodología empleada se estructura en tres etapas: **Obtención de fertilizantes minerales (estruvita), Producción de bioestimulantes y biopesticidas y análisis de viabilidad**. Para la obtención de los fertilizantes minerales a partir de fangos de EDAR e industriales se llevaron a cabo ensayos a escala laboratorio y planta piloto (Figura 1) que permitieron estudiar el proceso de cristalización de estruvita. Para la producción de bioestimulantes y biopesticidas se llevaron a cabo ensayos en laboratorio a diferentes escalas mediante fermentación en estado sólido (FES) utilizando

cepas microbianas seleccionadas por su capacidad de generar metabolitos con actividad bioestimulante o biopesticida.



Figura 1. Montajes y plantas piloto empleados en los ensayos FES y Cristalización de estruvita.

V. RESULTADOS

Cristalización de estruvita

Se realizaron ensayos a escala de laboratorio para optimizar la recuperación de fósforo a partir de fangos urbanos de EDAR y agroalimentarios (Purines). El proceso se basó en la solubilización del fósforo mediante fermentación enzimática y mediante acidificación química, seguida de su recuperación como estruvita. Durante esta fase, se evaluaron de forma sistemática variables clave como pH, temperatura, tiempo de reacción y, especialmente, la relación molar Mg/P (1:1; 1,5:1; 10:1; 100:1), identificada como un parámetro crítico para la eficiencia del proceso. Asimismo, se analizó el efecto de microorganismos acidófilos en la acidificación del medio, la desnaturalización de proteínas, y la influencia de cationes como Ca^{2+} y Mg^{2+} en la precipitación del fósforo (Cerrillo *et al.*, 2015; Zamora Saltos, E. N. 2025).

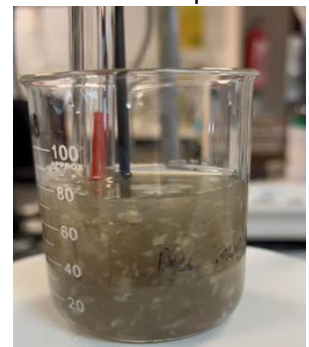


Figura 2. Ejemplo del precipitado obtenido en laboratorio

También se estudió el impacto de diferentes fuentes de carbono, tiempos de reacción y la presencia de otros elementos (Fe, Al), así como la posible integración del proceso en líneas de tratamiento existentes. La etapa de precipitación se llevó a cabo mediante elevación controlada del pH en presencia de MgCl_2 como fuente de magnesio. En este contexto, la optimización de la relación Mg/P resultó determinante, ya que, a diferencia de sistemas ideales donde la relación estequiométrica es cercana a 1,2:1, la elevada concentración de Ca^{2+} en los fangos requirió incrementar la dosis de Mg para favorecer la formación de estruvita y evitar la competencia iónica. Los precipitados obtenidos fueron caracterizados mediante análisis elemental, difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido (SEM). Los resultados confirmaron la formación de estruvita con características mineralógicas comparables a las de productos comerciales, validando la viabilidad del proceso en condiciones reales.

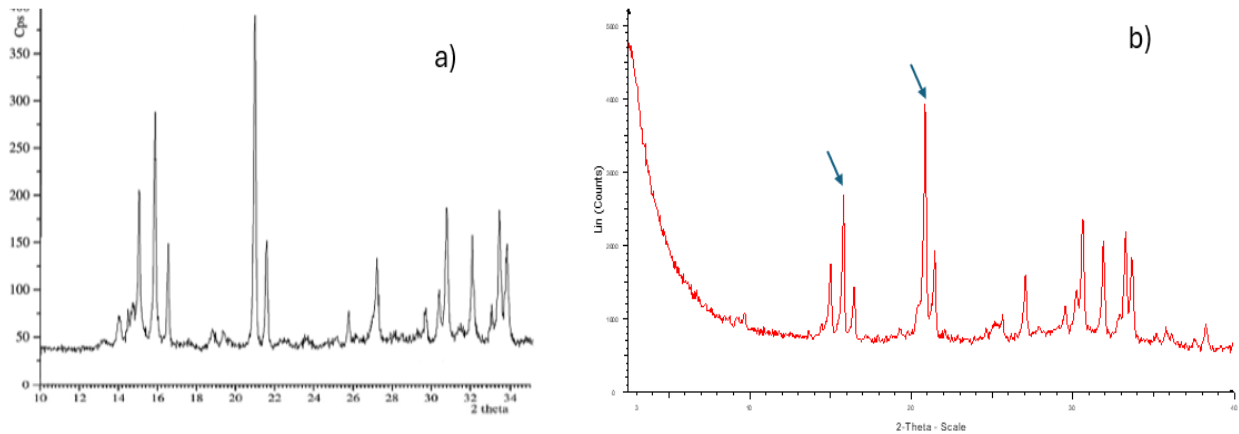


Figura 3. Ejemplo de difracción de rayos X de los cristales obtenidos en laboratorio. a) Estruvita comercial, b) solido precipitado en el ensayo.

Tras los ensayos en laboratorio, FACSA llevo a cabo el estudio de cristalización de estruvita empleando fangos de EDAR en una planta piloto diseñada, construida e instalada en la EDAR de Castellón. La planta piloto está formada por 2 reactores de cristalización de 220L equipados con sondas de pH, temperatura, nivel y cuadro eléctrico de control (figura 3). También, cuenta con un sistema de adición de productos químicos que permiten la dosificación controlada de NaOH y MgCl₂.



Figura 3. Planta piloto de cristalización de estruvita.

Para el estudio en planta piloto se realizó una caracterización completa de los distintos tipos de fangos de la EDAR de Castellón con el objetivo de evaluar su potencial para la recuperación de fósforo en forma de estruvita. A partir de estos análisis, se prepararon mezclas de fango mixto y escurrido de centrífuga en diferentes proporciones para maximizar la liberación de fósforo soluble (P-PO₄) disponible para la cristalización. Los resultados mostraron que tras la acidificación química se alcanzan concentraciones de hasta 175 mg/L de P-PO₄ y alrededor de 300 mg/L de N-NH₄, valores adecuados para procesos de precipitación de estruvita.

Para la operación de la planta piloto se definieron seis etapas clave: **llenado, acidificación, decantación, adición de reactivos, cristalización y separación**. Se llevaron a cabo ensayos en discontinuo para optimizar las condiciones de cada etapa, con especial atención a los procesos de decantación y cristalización. El estudio se centró en identificar las condiciones óptimas para

maximizar la liberación de fósforo durante la acidificación y su posterior recuperación en forma de estruvita. Se evaluaron tanto procesos de acidificación química como biológica, siendo óptima una mezcla de 40% fango mixto y 60% escurrido de centrífuga, que permitió una mayor solubilización del fósforo. Posteriormente, el sobrenadante fue sometido a cristalización a pH 9, variando la relación molar Mg:P mediante la adición de MgCl₂. En cada ensayo se modificó un único parámetro, principalmente la relación Mg:P, para analizar su influencia en la eficiencia de cristalización y en la calidad del producto obtenido.

Para poder seguir el transcurso de la reacción y caracterizar cada etapa, se llevaron a cabo análisis de diferentes parámetros en cada etapa, tales como: pH, conductividad, P_{total}, P-PO₄³⁻, N_{total}, N-NH₄, Fetotal, Mgtotal, sólidos totales (ST) sólidos volátiles (SV) y sólidos en suspensión (SST y SSV). Todos los ensayos se realizaron en discontinuo, partiendo de un volumen total en la etapa de acidificación de 220 L y obteniéndose un volumen de clarificado entre 120 - 150 L en cada reactor. Tras la etapa de cristalización se recuperaba y secaba el producto obtenido para su posterior análisis y caracterización (Figura 4).



Figura 4. Material recuperado tras la etapa de cristalización.

Tras realizar el balance de fósforo y considerando la estequiometría de la reacción para la formación de la estruvita, se estimó que la producción de biofertilizante en cada ensayo es de 90 y 120 g de estruvita (1,0–1,5 kg/m³ de sobrenadante), en función de la disponibilidad de fósforo en el sobrenadante. Tras la cristalización, los sólidos se recuperaron mediante tamizado y el filtrado fue secado para su análisis. Las muestras se caracterizaron mediante ICP-MS y difracción de rayos X. Los resultados indican un contenido de estruvita del 40–50% y una fracción orgánica elevada (40–60%), atribuida a una decantación no completamente optimizada que favorece el arrastre de fango. No obstante, desde el punto de vista agronómico, este contenido orgánico puede resultar beneficioso al aportar carbono al suelo. Se observó que las relaciones molares cercanas al equilibrio teórico (1:1,2) maximizan la recuperación de fósforo, aunque persiste un contenido orgánico elevado debido a la presencia de fango. En cuanto a metales pesados, el producto cumple con los límites del Real Decreto 1051/2022, lo que confirma su aptitud para uso agrícola. Los difractogramas mostraron una buena correspondencia con la estruvita pura, confirmando su predominancia, con ligeras variaciones debidas a las impurezas presentes como la materia orgánica y compuestos asociados al fango, como el hierro.

Biopesticidas y bioestimulantes a partir de fangos de EDAR

En este proyecto se llevó a cabo de forma paralela el estudio de obtención de biopesticidas a escala laboratorio y piloto, mediante el proceso de fermentación en estado sólido (FES) empleando cepas específicas de bacterias y/o hongos (*Bacillus thuringiensis* o *Trichoderma Harzianum*) que permite

la producción de toxinas y esporas altamente activas contra un gran número de plagas. El proceso de fermentación en estado sólido también ha sido empleado para la obtención de bioestimulantes, concretamente la producción de in-dol-3-ácido acético (IAA) que es una fitohormona de la clase de las auxinas ampliamente producida en las plantas que juega un papel importante en la fisiología vegetal. La IAA en este proyecto se ha producido empleando el hongo *Trichoderma spp*, utilizando los fangos de EDAR, pasto y restos de poda (Font-Pomarol *et al.*, 2025, Solano Porras *et al.*, 2025).

Tras la obtención de los subproductos se han llevado a cabo ensayos en campo para evaluar su aplicación en agricultura. Se caracterizaron los bioproductos obtenidos y su potencial agronómico mediante formulaciones con materiales procedentes de fangos digeridos tratados por fermentación en estado sólido (FES), con y sin inóculo de *Bacillus thuringiensis*. Ambos presentaron pH y conductividad elevados, humedad intermedia y alto contenido en nitrógeno amoniacal (7.500–9.000 ppm), junto con fósforo, potasio y nitrógeno orgánico. El alto contenido en materia orgánica indica baja mineralización. Los ensayos en contenedor, mezclando un 10% con sustrato estándar, confirmaron su potencial fertilizante. La estruvita mostró un comportamiento como fertilizante de liberación lenta, con disminución progresiva del amonio durante el cultivo (Valverde-Vozmediano, L. *et al.*, 2025).

Por último, Se evaluó la sostenibilidad global de los bioproductos y tecnologías desarrolladas comparándolos con un escenario base de EDAR convencional. Todos los escenarios analizados mostraron una reducción del impacto ambiental. Los tratamientos de fangos estudiados en el proyecto mejoran la sostenibilidad, disminuyendo emisiones de gases de efecto invernadero y contribuyendo a la neutralidad climática.

VI. CONCLUSIONES

Los ensayos desarrollados a escala de planta piloto han permitido validar la viabilidad técnica de un esquema integrado de valorización de fangos, combinando la recuperación de fósforo en forma de estruvita y la fermentación en estado sólido. Los resultados obtenidos confirman que estas tecnologías pueden operar de forma estable y eficiente en condiciones reales, generando bioproductos con valor agronómico y demostrando su potencial para cerrar el ciclo de nutrientes entre la gestión de residuos y la agricultura, en línea con los principios de la economía circular.

Asimismo, la validación en planta piloto ha evidenciado que la combinación de estas soluciones no solo mejora el rendimiento ambiental, reduciendo impactos y emisiones, sino que también incrementa la viabilidad tecno-económica frente a los tratamientos convencionales basados en digestión anaerobia. Los bioproductos generados presentan un elevado potencial de aprovechamiento agrícola, contribuyendo a sustituir parcialmente fertilizantes minerales y favoreciendo modelos más sostenibles y resilientes de producción agrícola.

VII. AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer al proyecto **FERTILAB (PLEC2022-009252)** financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y la Unión Europea, Next Generation EU/PRTR.



También, a todos los socios del proyecto y entidades colaboradoras: Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), Universitas Miguel Hernández (UMH), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries, Basque Centre for Climate Change (BC3), Sociedad de Fomento Agrícola Castellonense (FACSA).

Entidad Participante y colaboradora: Ajuntament de Castellón de la plana.



VIII. REFERENCIAS

1. Cerrillo, M. et al. (2015). Struvite precipitation in manure anaerobic digestion plants. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 90(6), 1135–1143. <https://doi.org/10.1002/jctb.4459>
2. Chen, R.-F. et al. (2021). Effect of organic substances on electrochemical struvite precipitation from swine wastewater. <https://doi.org/10.3390/membranes11080594>
3. Font-Pomarol, J. et al. (2025). Solid-state fermentation of digested sewage sludge to produce *Bacillus thuringiensis*. *Journal of Environmental Management*, 394, 127478. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.127478>
4. Ghoreishi, G. et al. (2026). Biostimulant production from green waste by solid-state fermentation. *Bioresource Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.01.026>
5. Liu, X.; Wang, J. (2019). Impact of calcium on struvite crystallization in wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 378, 122121. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122121>
6. Nelson, N. et al. (2003). Struvite precipitation in anaerobic swine lagoon liquid: effect of pH and Mg:P ratio. *Bioresource Technology*, 89(3), 229–236. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00076-2](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00076-2)
7. Valverde-Vozmediano, L. et al. (2025). Sustainable phosphorus recovery from organic wastes via struvite precipitation. *Agronomy*, 15, 2305. <https://doi.org/10.3390/agronomy15102305>
8. Valverde-Vozmediano, L. et al. (2025). Comparative study of mineral, organomineral and organic fertilizers for lettuce. *Agronomy*, 15(7), 1661. <https://doi.org/10.3390/agronomy15071661>
9. Solano Porras, R. C. et al. (2025). Biostimulant production from green waste by solid-state fermentation to improve lettuce cultivation. *Chemosphere*, 370, 143919. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143919>
10. Zamora Saltos, E. N. (2025). Optimización de la precipitación de estruvita a partir de purines de cerdo. Trabajo Final de Grado, Universitat Politècnica de Catalunya. <https://upcommons.upc.edu/entities/publication/b20f2022-5448-4123-bf03-f6c5aaa3b6dd>