

Bioaugmentación de un inóculo anaerobio y nitrificación parcial de un efluente de rastro municipal para la implementación de un proceso Anammox

Sergio Reyes-Rosas ^{1,2}, Francisco David Franco-Márquez ¹, Óscar Marín-Peña ³, Norma Alejandra Vallejo-Cantú ¹, Alejandro Alvarado-Lassman ^{1,*}

¹ División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba, Av. Oriente 9, 852. Col. Emiliano Zapata Orizaba, Veracruz C.P. 94320, México.

² Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Zongolica. Km 4 Carretera a la Compañía S/N, Tepetitlanapa, Zongolica 95005, Veracruz, México.

³ Estancia Posdoctoral SECIHTI (Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación), Tecnológico Nacional de México/ITSde Misantla, Km 1.8 Carretera a Loma del Cojolite, Misantla 93821, Veracruz, México

* Autor de correspondencia: alejandro.al@orizaba.tecnm.mx

Desarrollo Sustentable (Bioprocesos)

Recibido: 13 de junio de 2025 Aceptado: 26 de julio de 2025 Publicado: 10 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.681>

Resumen: El tratamiento de aguas residuales provenientes de rastros municipales representa un desafío ambiental debido a la elevada carga de nitrógeno amoniacal y materia orgánica presente en estos efluentes. En este estudio preliminar se evaluó la adaptación de comunidades bacterianas para el desarrollo de los procesos de nitrificación parcial (NP) y Anammox, con el objetivo de favorecer la remoción de nitrógeno en descargas de rastro municipal. Para ello, se emplearon dos reactores: un reactor anaerobio destinado a la bioaugmentación de consorcios bacterianos y un reactor aerobio cónico de 10 L utilizado para la NP. El reactor anaerobio fue operado en dos etapas (intermitente y semicontinua), monitoreándose parámetros como demanda química de oxígeno (DQO), pH, sólidos totales y volátiles, y el volumen de biogás producido. El reactor aerobio fue acondicionado mediante operación por lotes con agua residual de rastro y, posteriormente, se realizaron estudios cinéticos bajo concentraciones controladas de amonio. En el reactor anaerobio se observó una producción estable de biogás (1–1.5 L a 35 °C) bajo condiciones ligeramente alcalinas (pH 7–8), asociadas a actividad metanogénica; adicionalmente, los resultados cinéticos sugieren la presencia de actividad Anammox, evidenciada por el consumo simultáneo de nitrito y amonio. En el reactor aerobio no se logró inicialmente la conversión de amonio a nitrito, observándose acumulación de nitrato; no obstante, tras el acondicionamiento, se detectó una inhibición parcial de la oxidación de nitrito. Los resultados indican que la estabilización del sistema requiere un periodo prolongado de adaptación microbiana, así como ajustes en la aireación y en la carga orgánica aplicada. Los resultados obtenidos permiten identificar condiciones operativas y limitaciones clave que deben considerarse en el diseño y puesta en marcha de sistemas biológicos orientados al tratamiento de aguas residuales de rastros, particularmente en el desarrollo de esquemas sostenibles y de bajo costo.

Palabras clave: agua residual de rastro, Anammox, oxígeno disuelto, comunidades microbianas, bioaugmentación, remoción carbono/nitrógeno

Bioaugmentation of an anaerobic inoculum and partial nitrification of municipal slaughterhouse effluent for Anammox process implementation

Abstract: The treatment of wastewater generated from municipal slaughterhouses represents an environmental challenge due to the high ammoniacal nitrogen and organic matter loads present in these effluents. In this preliminary study, the adaptation of bacterial communities was evaluated for the development of partial nitrification (PN) and Anammox processes, with the aim of promoting nitrogen removal from municipal slaughterhouse discharges. For this purpose, two reactors were employed: an anaerobic reactor intended for the bioaugmentation of bacterial consortia and a 10 L conical aerobic reactor used for partial nitrification. The anaerobic reactor was operated in two stages (intermittent and semicontinuous), monitoring parameters such as chemical oxygen demand (COD), pH, total and volatile solids, and the volume of biogas produced. The aerobic reactor was conditioned through batch operation using slaughterhouse wastewater, followed by kinetic studies under controlled ammonium concentrations. In the anaerobic reactor, a stable biogas production (1–1.5 L at 35 °C) was observed under slightly alkaline conditions (pH 7–8), associated with methanogenic activity; additionally, kinetic results suggest the presence of Anammox activity, evidenced by the simultaneous consumption of nitrite and ammonium. In the aerobic reactor, the conversion of ammonium to nitrite was not initially achieved, and nitrate accumulation was observed; however, after the conditioning period, a partial inhibition of nitrite oxidation was detected. The results indicate that system stabilization requires an extended period of microbial adaptation, as well as adjustments in aeration and applied organic loading. The findings allow the identification of key operational conditions and limitations that should be considered in the design and start-up of biological systems for slaughterhouse wastewater treatment, particularly in the development of sustainable and low-cost treatment schemes.

Keywords: slaughterhouse wastewater, Anammox, dissolved oxygen, microbial communities, bioaugmentation, carbon/nitrogen removal

Introducción

El tratamiento biológico de aguas residuales provenientes de la industria cárnica representa un desafío técnico y ambiental de gran relevancia, debido a la alta carga de nutrientes, materia orgánica y microorganismos patógenos que caracterizan estos efluentes. En particular, los rastros municipales generan descargas con elevadas concentraciones de nitrógeno en sus diferentes formas (amonio, nitritos y nitratos), así como compuestos orgánicos fácilmente biodegradables que pueden provocar procesos de eutrofización en cuerpos receptores si no son tratados adecuadamente (Marín-Peña *et al.*, 2024).

Ante esta problemática, el desarrollo de tecnologías sostenibles de bajo costo y requerimientos energéticos moderados se ha vuelto una necesidad prioritaria. En este contexto, los procesos biológicos avanzados como la oxidación anaerobia del amonio (Anammox) y la nitrificación parcial (NP) han demostrado ser alternativas prometedoras para la eliminación eficiente de nitrógeno, reduciendo la dependencia de oxígeno y carbono externo (Singh *et al.*, 2025; Reyes-Rosas *et al.*, 2025).

El proceso Anammox se basa en la capacidad de ciertas bacterias del filo *Planctomycetota* para oxidar amonio utilizando nitrito como aceptor de electrones bajo condiciones anóxicas, generando nitrógeno gaseoso (N_2) como producto final. Este mecanismo biológico no sólo reduce el consumo de energía, sino que también minimiza la producción de lodos en comparación con los sistemas nitrificación–desnitrificaciones convencionales (Reyes-Rosas *et al.*, 2025). Sin embargo, para que la etapa Anammox sea efectiva, es necesario un pretratamiento que acumule nitrito sin formar nitrato, proceso conocido como nitrificación parcial (Owaes *et al.*, 2024).

En la nitrificación parcial, la regulación del oxígeno disuelto juega un papel determinante. La operación bajo condiciones de microareación —es decir, con concentraciones de oxígeno entre 0.2 y 1.0 mg/L— permite favorecer la actividad de bacterias amonio-oxidantes (AOB) e inhibir a las bacterias nitrito-oxidantes (NOB), logrando la acumulación controlada de nitrito (Yang *et al.*, 2015; Owaes *et al.*, 2024). Estrategias recientes como la aireación intermitente y los sistemas de microareación de alta frecuencia han demostrado mejorar la eficiencia del proceso Anammox y de Nitrificación Parcial, al crear gradientes redox favorables para la coexistencia de comunidades aerobias y anóxicas en un mismo reactor (Chi *et al.*, 2021; Loughrin *et al.*, 2025).

Por otro lado, la materia orgánica presente en los efluentes de rastro influye directamente en la dinámica del proceso. Un exceso de carbono biodegradable puede competir con el consumo de nitrito por las bacterias Anammox, reduciendo la eficiencia de eliminación de nitrógeno. Por ello, mantener una relación C/N adecuada (<2) resulta esencial para asegurar la predominancia de las rutas autotróficas (Singh *et al.*, 2025; Kalinčíková & Procházka, 2025).

Considerando lo anterior, la presente investigación se centra en evaluar el efecto combinado de la microaeración y el contenido de carbono (expresado como DQO) sobre la nitrificación parcial de aguas residuales de rastro municipal. El objetivo es establecer las condiciones de operación que permitan una remoción eficiente de nitrógeno y materia orgánica con el menor consumo energético posible, contribuyendo al desarrollo de alternativas sostenibles para el tratamiento de efluentes en la industria cárnica, especialmente en contextos rurales donde los recursos tecnológicos y económicos son limitados (Marín-Peña *et al.*, 2023).

Materiales y Métodos

La bioaumentación de las colonias de bacterias se realizó en un reactor de vidrio de tres bocas con volumen útil de 2.5 L el cual se conectó a una bomba dosificadora marca Kamoer y a un sistema de captación de biogás. Dentro del reactor se encuentra una matriz polimérica de fibras comercial sujeta por un soporte cilíndrico con aberturas circulares. La operación del reactor consistió de dos etapas. En la primera etapa se operó de forma intermitente adicionando y retirando en cada lote dos litros del sustrato el cual estaba conformado por fracción líquida de frutas y verduras con una concentración de 5 gDQO/L. La alimentación se realizó cada segundo día. Para la segunda etapa, se operó en modo semicontinuo retirando 660 ml del reactor y suministrando la misma cantidad del sustrato preparado con 800 mL de fracción líquida de frutas y verduras con una concentración de 5 gDQO/L y como fuente de nitrógeno 60 mL de fracción líquida de camarón con una concentración de 56.3 gDQO/L. Para cada lote, se realizó análisis de DQO total y soluble, medición de pH, así como %ST, %SV, humedad y ceniza. Para la primera etapa se utilizaron 100 ml de biomasa de un

reactor anaerobio de biopelícula que trata residuos sólidos orgánicos urbanos, mientras que para la segunda etapa se contabilizó la biomasa total presente y se retiró la mitad (94 mL).

Para corroborar la presencia de actividad anammox en el reactor, después de las dos etapas se realizó una cinética de 8 horas de duración, retirando 600 mL del licor mezclado del reactor y adicionando 125 mL de solución de amonio, 150 mL de solución de nitritos y 325 mL de fracción líquida de frutas y verduras. Se retiraron muestras cada hora, determinándose la concentración de nitratos, nitritos, amonio y la producción de biogás.

Para el proceso de nitrificación parcial se utiliza un reactor aerobio de fondo cónico con de 10 L y volumen útil de 8 litros conectado a un sistema de aireación por medio de una bomba de aire con un difusor sumergido a la altura de los lodos activados sedimentados en el fondo cónico del reactor. En primera instancia se realizó el acondicionamiento de los lodos activados provenientes del Fideicomiso del Sistema de Aguas Residuales del Alto Río Blanco (FIRIOB) por medio de la alimentación de agua residual del rastro municipal de Orizaba, Ver. a un nivel de aireación de 3.5 ± 0.5 mg O_2/L con una carga de DQO soluble de 1 g/L de forma preliminar. Después de suministrar 8 lotes con una duración de 4 días cada uno, se realizó un estudio cinético con duración de ocho horas para el análisis del comportamiento a través del tiempo de las concentraciones del amoníaco, nitrito y nitrato, así como la remoción de DQO del reactor utilizando un sustrato de frutas y verduras a 1 g DQO/L y la adición de amonio también con una concentración de 1 g/L.

Resultados y Discusión

En la Figura 1 se presenta de manera conjunta la producción de biogás y el pH en el reactor de bioaumentación dividido por una línea punteada, donde los primeros 12 lotes corresponden a la primera etapa de operación del reactor y los 10 lotes posteriores a la segunda etapa. Durante la primera etapa se observa una mayor variabilidad en los valores de pH, mientras que en la segunda etapa se evidencia una estabilización del pH en el efluente, manteniéndose en un rango de 7 a 8. Este intervalo corresponde a un entorno ligeramente alcalino, característico de condiciones favorables para la actividad metanogénica. Con respecto a la producción de biogás, durante la primera etapa se identifica un periodo de aclimatación del sistema, en el cual la producción de biogás es baja, alcanzando valores máximos cercanos a 250 mL en los tres últimos lotes de esta fase; sin embargo, posteriormente se observa un incremento significativo, estabilizándose en valores entre 1 y 1.5 L, lo que sugiera una mejora en la actividad metabólica del consorcio microbiano.

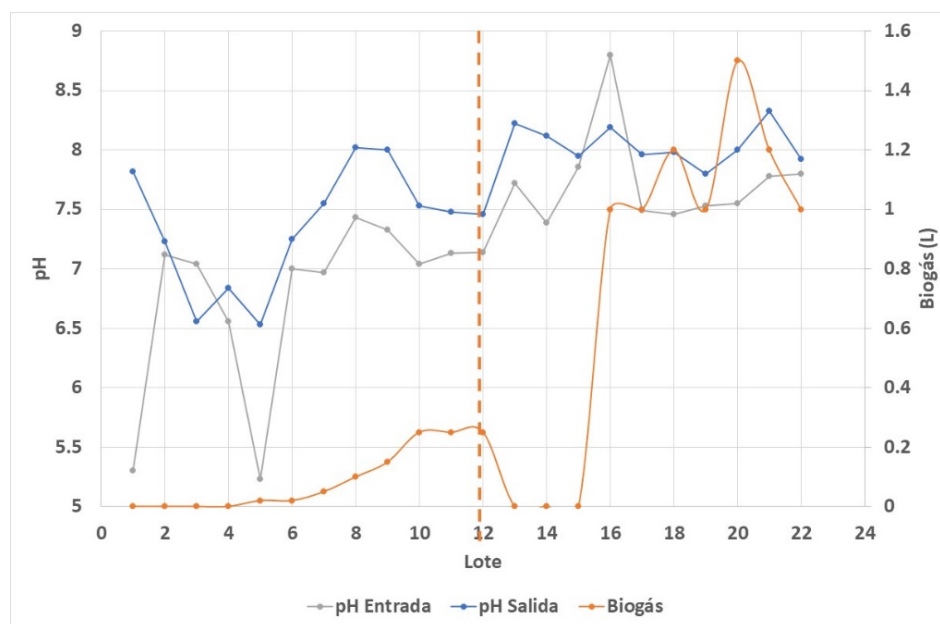


Figura 1. Producción de biogás y pH en el reactor anaerobio de bioaumentación

La Figura 2 muestra los resultados de remoción de la demanda química de oxígeno (DQO). Durante la primera etapa, los valores de remoción cercanos a cero reflejan la acumulación de carga orgánica dentro del reactor. A partir del lote 6 se comienza a observar valores fluctuantes de remoción de DQO y ya durante la segunda etapa las eficiencias de

remoción se incrementan con promedios de 50.29 % para la DQO soluble y 68.52 % para la DQO total, observándose una tendencia general al incremento, lo que indica una estabilización progresiva del reactor anaerobio.

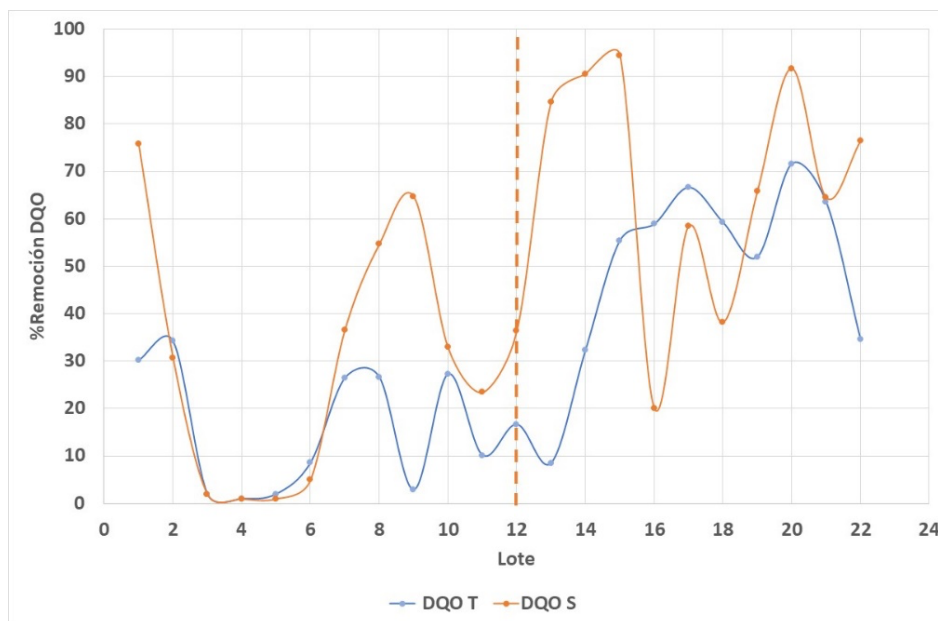


Figura 2. Remoción de la DQO en el reactor de bioaumentación

Para evaluar el éxito del proceso de bioaumentación, se realizó una cinética utilizando como fuente de carbono fracción líquida de frutas y verduras, suplementada con una solución de nitritos y amonio. La cinética se realizó durante ocho horas, durante las cuales se observa la eliminación casi completa de los nitritos y una remoción del 64 % de la DQOs. Así mismo, la concentración de amonio presentó una disminución del 36.47 % lo que sugiere que parte del nitrito fue utilizado en combinación con el amonio por parte de bacterias Anammox, confirmando la actividad de este proceso biológico en el sistema evaluado (Figura 3).

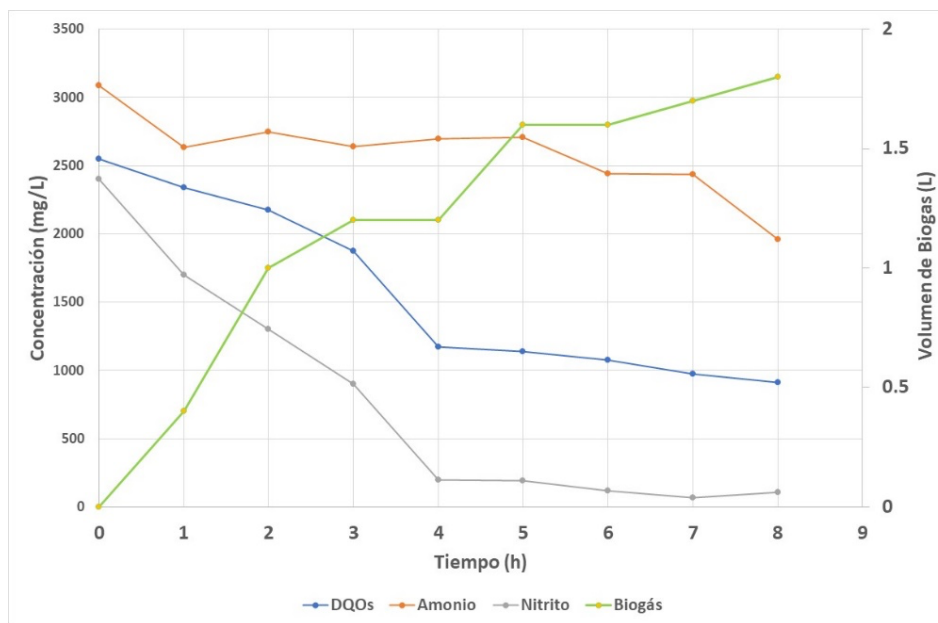


Figura 3. Cinética de degradación de anaerobia de amonio y nitrito

Con respecto al reactor aerobio, se realizó el acondicionamiento del reactor usando sustrato de agua residual de rastro a 1 g DQOs/L. El sustrato presenta concentraciones promedio de 41 mg/L de amonio, 4.0 mg/L de nitrato y no se

observó presencia de nitritos. A lo largo de los lotes, se observan concentraciones fluctuantes de nitrato a la salida del reactor de entre 5 y 25 mg/L y no se registraron nitritos a la salida lo que evidencia un exceso de oxígeno disuelto que promueve la oxidación completa del nitrógeno hacia nitratos. La remoción de la DQO soluble tuvo un promedio de 65.8 % a lo largo de los lotes.

Finalmente se realizó una cinética de 8 horas en el reactor aerobio después del acondicionamiento alimentando fracción líquida de frutas y verduras adicionada con amonio para evaluar su comportamiento (Figura 4).

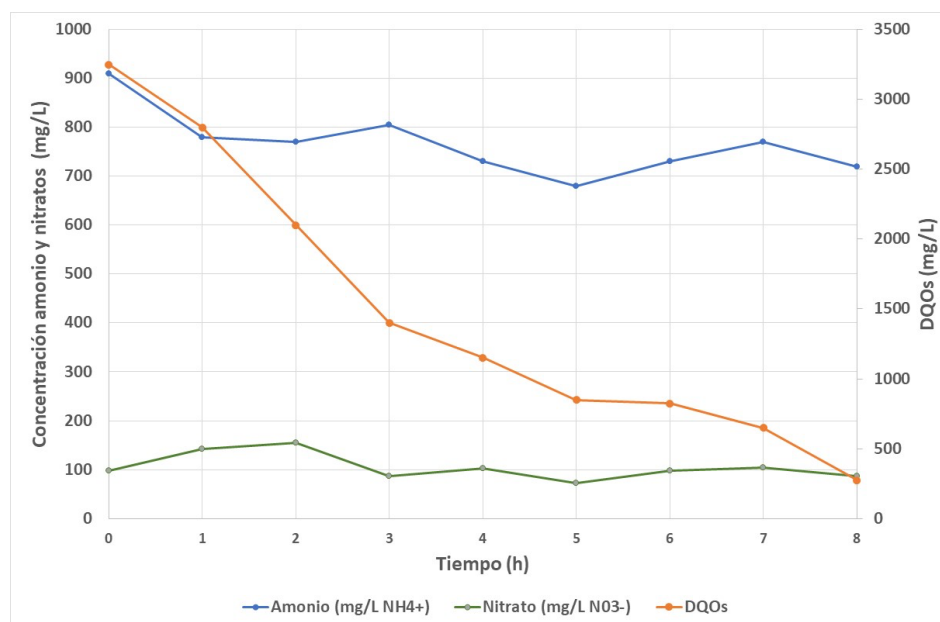


Figura 4. Cinética de degradación aerobia de amonio

Se observa que aun no se tiene una actividad eficiente del lodo aerobio, ya que la remoción de amonio es baja (17 %). En contraste, la remoción de la DQO fue de 93.85 % lo que demuestra que el lodo es capaz de remover de manera eficiente la materia orgánica presente en el agua debido a que el lodo proviene de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas con baja presencia de compuestos nitrogenados.

Conclusiones

De acuerdo con la literatura, el acoplamiento de los procesos Anammox y nitrificación parcial presenta un alto potencial para el tratamiento de la carga de nitrógeno amoniacal presente en las aguas residuales de rastros. Sin embargo, a diferencia de los procesos físicos o estrictamente químicos, los procesos bioquímicos requieren un periodo previo de acondicionamiento, durante el cual las comunidades microbianas se adaptan a las condiciones operativas y a la función metabólica deseada.

El reactor de bioaumentación de colonias Anammox, aunque se encuentra en una etapa temprana de desarrollo, mostró una actividad aceptable considerando que el lodo anaerobio utilizado proviene de un sistema con presencia de compuestos nitrogenados, pero dominado por rutas de desnitrificación. Por otro lado, el reactor aerobio destinado a la nitrificación parcial demostró una elevada eficiencia en la remoción de materia orgánica; no obstante, se requiere un mayor tiempo de adaptación y un ajuste en el sistema de aireación para favorecer el desarrollo de bacterias productoras de nitritos sobre las bacterias nitrificantes completas, con el fin de lograr un acoplamiento más eficiente entre los procesos aerobio y anaerobio.

Agradecimientos y financiamiento: Este proyecto fue desarrollado con financiamiento del Tecnológico Nacional de México con número de proyecto 22008.25-P. Se agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca de maestría otorgada al estudiante Francisco David Franco Márquez.

Bibliografía

- Chi, Y., Shi, X., Jin, P., Wang, X. C., Ren, T., Ren, B., & Jin, X. (2021). Enhanced nitrogen removal by partial nitrification–anammox process with a novel high-frequency micro-aeration (HFMA) mode: Metabolic interactions among functional bacteria. *Bioresource Technology*, 342, 125917. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125917>
- Kalinčiková, Z., & Procházka, J. (2025). Benefits and experiences of partial nitrification in mainstream wastewater treatment. *IWA Specialized Conference Proceedings*, 14(1), 116010. <https://trivent-publishing.eu/img/cms/IWA%2014th%202025/10-%20Zuzana%20Kalinčiková,%20Jindřich%20Procházka.pdf>
- Loughrin, J. H., Silva, P. J., Antle, S. W., Lovanh, N., Vanotti, M. B., & Sistani, K. R. (2025). Design and initial testing of acoustically stimulated anaerobic digestion coupled with effluent aeration for agricultural wastewater remediation. *AgriEngineering*, 7(5), 136. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7050136>
- Marín-Peña, O., Sandoval-Herazo, L. C., & Alvarado-Lassman, A. (2023). Implementación de un tratamiento biológico para efluentes de rastros en zonas rurales. *Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad*, 2(1), 423–432. <https://aldeser.org/journals/index.php/TERYS/article/view/384>
- Marín-Peña, O., Sandoval-Herazo, L. C., & Alvarado-Lassman, A. (2024). Aguas residuales de rastros municipales: El impacto inadvertido en el entorno rural. *Revista de Divulgación Científica iBIO*, 6(1), 153. <http://revistaibio.com/ojs33/index.php/main/article/view/153>
- Owaes, M., Gani, K. M., Kumari, S., & Seyam, M. (2024). Implementation of partial nitrification in wastewater treatment systems by modifications in operational strategies: A review. *Environmental Technology Reviews*, 13(1), 379–397. <https://doi.org/10.1080/21622515.2024.2354518>
- Reyes-Rosas, S., Alvarado-Lassman, A., Marín-Peña, Ó., Landeta-Escamilla, O., Rosas-Mendoza, E. S., & Méndez-Contreras, J. M. (2025). Anammox: Un tratamiento sustentable para el agua residual de rastros. *Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad*, 4(1), 111–117. <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.482>
- Singh, P., Bisen, M., Kulshreshtha, S., Kumar, L., Choudhury, S. R., Nath, M. J., Mandal, M., Kumar, A., & Patel, S. K. S. (2025). Advancement in anaerobic ammonia oxidation technologies for industrial wastewater treatment and resource recovery: A comprehensive review and perspectives. *Bioengineering*, 12(4), 330. <https://doi.org/10.3390/bioengineering12040330>
- Yang, J., Trela, J., Zubrowska-Sudol, M., & Plaza, E. (2015). Intermittent aeration in one-stage partial nitrification/anammox process. *Ecological Engineering*, 75, 413–420. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.11.016>