

Bacterias Anammox y su Aplicación Biotecnológica en Lixiviados de Residuos Orgánicos

Roberto Carlos Moreno-Quirós ^{1,*}, Oswaldo Guzmán-López ¹ y Sergio Martínez-Hernández ²

¹ Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana, Coatzacoalcos, Veracruz, México

² Instituto de Biotecnología y Ecología Aplicada, INBIOTECA, Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México

* Autor de correspondencia: robemoreno@uv.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 20 de agosto de 2026

Aceptado: 15 de septiembre de 2026

Publicado: 28 de septiembre de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i2.759>

Resumen: Las bacterias anammox son microorganismos de gran interés biotecnológico que en los últimos años han permitido mejorar la comprensión de la dinámica del nitrógeno en el medio ambiente. Estas bacterias tienen la capacidad de transformar el amonio y el nitrito en nitrógeno molecular bajo condiciones anaerobias, lo que puede reducir los requerimientos de oxígeno del tratamiento en comparación con los métodos tradicionales de eliminación de nitrógeno. El presente trabajo explora la aplicación del proceso anammox en el tratamiento de lixiviados de residuos orgánicos. En ensayos realizados en reactores de laboratorio bajo condiciones controladas y utilizando lixiviado diluido, se alcanzaron remociones de nitrógeno amoniacal cercanas o superiores al 90 %, dependiendo de la concentración inicial y del tiempo de tratamiento. Por ejemplo, una concentración inicial de 200 mg N-NH₄⁺/L disminuyó hasta aproximadamente 20 mg N-NH₄⁺/L después de cuatro días de tratamiento. Estos resultados corresponden a condiciones experimentales y representan una evaluación de la viabilidad del proceso.

Palabras clave: bacterias anammox, residuos sólidos orgánicos, tratamiento de lixiviados, biotecnología ambiental, sostenibilidad

Introducción

El término anammox se origina del acrónimo en inglés ANaerobic AMMonium OXidation (Kuenen, 2008). Estas bacterias, descubiertas en la década de los noventa, poseen la habilidad excepcional de impulsar un mecanismo alterno, dentro del ciclo del nitrógeno, para transformar el amonio (Figura 1). El amonio (NH₄⁺), el nitrito (NO₂⁻) y el nitrato (NO₃⁻) son distintas formas de nitrógeno inorgánico que pueden transformarse unas en otras mediante procesos biológicos. Las bacterias anammox convierten el amonio, utilizando nitrito, en nitrógeno molecular (N₂), lo que reduce los requerimientos de oxígeno respecto a los procesos convencionales de eliminación de nitrógeno, marcando una diferencia tangible frente a procesos como la nitrificación-desnitrificación (You *et al.*, 2020). Esto es importante por dos razones: la primera, porque el amonio en altas concentraciones es tóxico en el ambiente; y la segunda, porque tradicionalmente la reducción de estas concentraciones mediante tratamiento biológico ha implicado la oxidación del amonio en presencia de oxígeno.

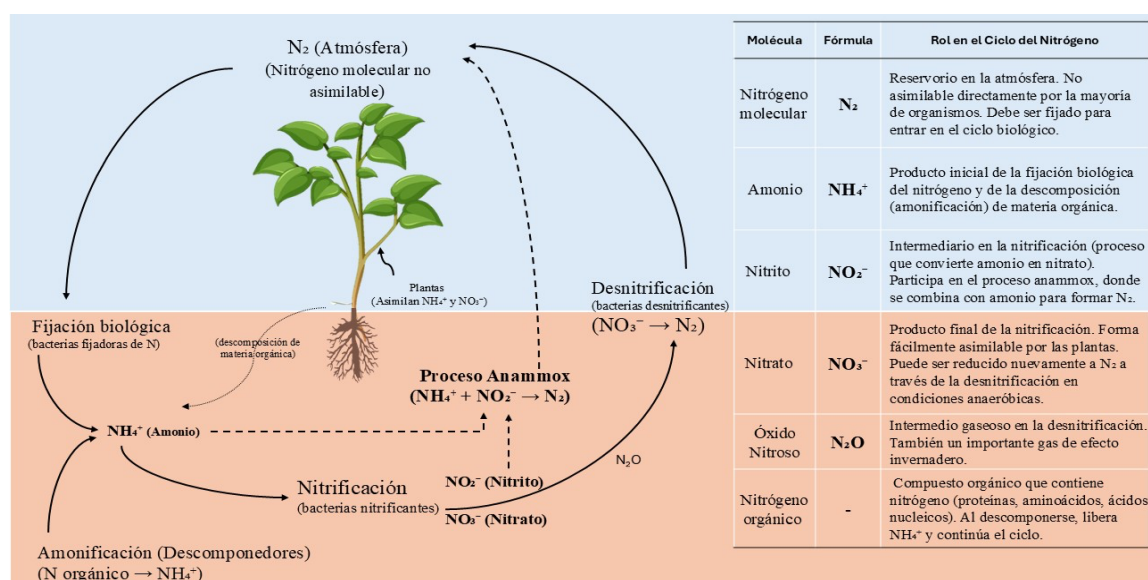


Figura 1. Representación del proceso anammox y su relación con las principales transformaciones del nitrógeno. El proceso anammox utiliza amonio (NH₄⁺) y nitrito (NO₂⁻) para formar nitrógeno molecular (N₂) bajo condiciones anaerobias. Adaptado de You *et al.* (2020).

El esfuerzo constante por encontrar soluciones a los desafíos ambientales ha permitido el descubrimiento de una amplia variedad de microorganismos con funciones especiales en la recuperación de los ecosistemas. El proceso anammox es realizado por un grupo especializado de bacterias pertenecientes al filo *Planctomycetota*, agrupadas principalmente en la clase "*Candidatus Brocadia*" y el orden "*Candidatus Brocadiales*". Dentro de este grupo se encuentran géneros como *Candidatus Brocadia*, *Candidatus Kuenenia*, *Candidatus Anammoxiglobus*, *Candidatus Scalindua* y *Candidatus Jettenia*. El término *Candidatus* se utiliza para indicar que estos microorganismos cuentan con suficiente información para su caracterización, principalmente obtenida mediante técnicas moleculares, pero mantienen un estatus taxonómico provisional. Estas bacterias comparten la capacidad de transformar amonio y nitrito en nitrógeno molecular bajo condiciones anaerobias (Jetten *et al.*, 2009).

La implementación de procesos basados en anammox puede ofrecer ventajas frente a los sistemas convencionales de nitrificación–desnitrificación, aunque la magnitud de estos beneficios depende de la configuración del tratamiento y de sus condiciones de operación. Por ejemplo, algunos estudios han reportado ahorros energéticos de hasta aproximadamente 60 %, asociados principalmente con una menor demanda de aireación (Cao *et al.*, 2017). Además, debido al metabolismo autotrófico de las bacterias anammox, no es necesario suministrar carbono orgánico externo, como metanol o acetato, para sostener directamente este proceso (Ahmad *et al.*, 2023). Su baja velocidad de crecimiento también puede disminuir la generación de biomasa excedente; en determinadas configuraciones se han reportado reducciones de hasta 90 % respecto de sistemas heterótrofos convencionales (Adams *et al.*, 2022). Estos valores deben entenderse como resultados obtenidos bajo condiciones específicas y no como porcentajes universales aplicables a cualquier sistema anammox. Finalmente, la reducción en las emisiones de CO₂ se deriva de la ausencia de oxidación de materia orgánica externa (Hu *et al.*, 2023).

La eficiencia energética asociada a estos procesos y la capacidad de adaptación de las bacterias anammox en diferentes ambientes son relevantes desde un punto de vista científico y han motivado la evaluación de sus aplicaciones frente a distintos problemas ambientales (You *et al.*, 2020). Desde su descubrimiento, se ha profundizado en entender su fisiología, con el propósito de explorar sus aplicaciones en diversos sectores, especialmente en el tratamiento de aguas residuales y de lixiviados asociados con la gestión de residuos sólidos urbanos.

Este artículo explora las características de las bacterias anammox y sus aplicaciones biotecnológicas, con especial atención al tratamiento de lixiviados generados durante el manejo y compostaje de residuos sólidos orgánicos (RSO). Los lixiviados generados en plantas de compostaje pueden presentar una composición fisicoquímica variable, altas concentraciones de demanda química de oxígeno (DQO), un indicador de la cantidad de sustancias oxidables presentes en agua; elevadas cargas de sólidos y productos intermedios de degradación capaces de afectar la actividad anammox.

Desarrollo

Anammox: una revolución biotecnológica

En los tratamientos convencionales, la eliminación biológica de nitrógeno suele realizarse mediante nitrificación–desnitrificación: primero, el amonio se transforma en nitrito y nitrato en presencia de oxígeno y, posteriormente, estos compuestos se convierten en nitrógeno gaseoso bajo condiciones con poco o ningún oxígeno. En cambio, las bacterias anammox operan en ausencia de oxígeno y utilizan nitrito para transformar el amonio en nitrógeno molecular. Por esta razón, el proceso requiere la presencia simultánea de ambos compuestos. Cuando una corriente residual contiene abundante amonio pero poco nitrito, como ocurre con los lixiviados estudiados, puede ser necesario incorporar una etapa previa de nitrificación parcial para generar de manera controlada el nitrito requerido.

Estas bacterias poseen una estructura interna especializada llamada anammoxosoma, donde ocurre gran parte del proceso anammox. Este compartimento ayuda a mantener separados algunos intermediarios reactivos generados durante el metabolismo, como la hidracina, un compuesto químico altamente reactivo que se forma temporalmente durante la transformación del nitrógeno. Además, su metabolismo es notablemente eficiente en términos energéticos (Jetten *et al.*, 2009).

El estudio de las bacterias anammox ha permitido desarrollar procesos con menor demanda energética y favorecer la implementación de alternativas más sostenibles y económicas. En sistemas biológicos convencionales, se requieren

etapas separadas para la nitrificación-desnitrificación, mientras que los sistemas basados en anammox permiten una ruta alternativa para la eliminación de nitrógeno, utilizando directamente amonio y nitrito. Esto puede reducir los requerimientos de aireación y los costos operativos, además de minimizar la producción de lodos residuales, un subproducto regularmente problemático en otros sistemas. En comparación con determinadas configuraciones convencionales de nitrificación-desnitrificación, se han reportado reducciones cercanas al 40 % en los requerimientos de oxígeno y de carbono orgánico externo cuando se emplean rutas que incorporan el proceso anammox (Fux & Siegrist, 2004).

Aplicaciones de las bacterias anammox

Su capacidad para eliminar amonio de manera eficiente ha brindado la oportunidad de utilizarlas en diversas aplicaciones ambientales. Un ejemplo de su implementación incluye el tratamiento de aguas residuales con alta carga de nitrógeno, como las aguas industriales, los efluentes agrícolas y las corrientes concentradas de nitrógeno en plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas (Ali & Okabe, 2015). Brevemente describiremos su aplicación en estos sectores:

Tratamiento de aguas residuales industriales

En sectores como la petroquímica y la producción de fertilizantes, los efluentes contienen altas concentraciones de amonio que pueden superar los 1500 mg N-NH₄⁺/L. En estos casos, la aplicación de bacterias anammox ha logrado reducir el nitrógeno amoniacal a menos de 50 mg/L, alcanzando eficiencias por encima del 90 % (Guo *et al.*, 2022). Estos efluentes presentan condiciones extremas, a menudo con pH elevado, salinidades altas o presencia de otros compuestos tóxicos, que han sido superadas gracias a las investigaciones sobre la adaptabilidad de las bacterias anammox. Este desempeño, en comparación con la nitrificación-desnitrificación convencional, posiciona al proceso anammox como una estrategia rentable y energéticamente favorable en el tratamiento industrial (Lackner *et al.*, 2014).

Aguas residuales agrícolas

Los efluentes generados por actividades agropecuarias, como en las granjas de cerdos, contienen altos niveles de nitrógeno, lo que puede contribuir a la eutrofización de cuerpos de agua ubicados río abajo de las zonas de producción. Los sistemas basados en el proceso anammox han demostrado ser efectivos en la eliminación de nitrógeno para concentraciones de entre 300 y 800 mg N-NH₄⁺/L reduciendo su impacto ambiental (Chen *et al.*, 2021; Wu *et al.*, 2024). Estos resultados muestran que el proceso anammox puede adaptarse a descargas con alto contenido orgánico y elevado nitrógeno, minimizando el impacto en cuerpos de agua cercanos y contribuyendo a disminuir el riesgo de eutrofización.

Plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas

Las plantas de tratamiento de aguas residuales que operan con sistemas convencionales suelen recibir concentraciones de nitrógeno amoniacal considerablemente menores que las presentes en algunas corrientes concentradas. En sistemas anammox a escala real destinados al tratamiento de líquidos provenientes de la digestión de lodos, Feng *et al.* (2024) evaluaron dos reactores conectados en serie. El primero recibió aproximadamente 1785 mg N-NH₄⁺/L y redujo la concentración a cerca de 298 mg N-NH₄⁺/L, mientras que después del segundo reactor se registraron alrededor de 76 mg N-NH₄⁺/L. Estos resultados ilustran la aplicación del proceso en corrientes con altas cargas de nitrógeno amoniacal. Con la mejor comprensión del proceso, se ha conseguido aumentar la eliminación de nitrógeno mientras se disminuyen los costos de operación y el consumo energético (Cao *et al.*, 2017).

Además de estas aplicaciones tradicionales, el interés por el uso de las bacterias anammox está creciendo en otros asuntos prioritarios, como la gestión de lixiviados de residuos sólidos urbanos.

El tratamiento de lixiviados: un reto para la biotecnología ambiental

Algunos trabajos desarrollados por Moreno-Quirós *et al.* (2025a; 2025b) se han enfocado en la caracterización de RSO y en el tratamiento de sus lixiviados, con el objetivo de encontrar soluciones biotecnológicas viables. Los lixiviados son

líquidos que se forman como resultado de la descomposición de la materia orgánica y la percolación del agua de lluvia. Durante este proceso pueden arrastrar compuestos presentes en los residuos y, en algunos casos, contaminantes tóxicos; además son ricos en materia orgánica y nitrógeno, por lo que representan un desafío para el medio ambiente, ya que su liberación sin tratamiento en suelos y cuerpos de agua cercanos genera impactos ambientales graves.

Como parte de esta investigación, se realizó una caracterización en el laboratorio de los lixiviados recolectados en el Centro de Compostaje Municipal de Xalapa, Veracruz (Figura 2), donde se analizaron parámetros como volumen generado, DQO y concentraciones de nitrógeno inorgánico (amonio, nitrito y nitrato). Los resultados revelaron altas concentraciones de materia orgánica, con un promedio cercano a 69,000 mg/L expresado como DQO, y concentraciones de nitrógeno amoniacal de hasta 2000 mg N-NH₄⁺/L. En contraste, las concentraciones de nitrito fueron bajas. Esta diferencia representa uno de los principales retos para aplicar el proceso anammox, ya que estas bacterias necesitan simultáneamente amonio y nitrito para producir nitrógeno gaseoso. Por ello, un lixiviado rico en amonio pero pobre en nitrito no proporciona por sí solo la proporción de sustratos requerida para mantener el proceso.



Figura 2. Generación de lixiviados en el Centro de Compostaje de la ciudad de Xalapa, Veracruz. Fotografía de los autores (2025).

Para resolver esta limitación, el esquema experimental incorporó una etapa previa de nitrificación parcial. En ella, únicamente una fracción del amonio se transforma en nitrito mediante un control cuidadoso de la aireación, mientras que el resto permanece como amonio. En los reactores evaluados, el oxígeno disuelto se mantuvo entre 0.2 y 0.7 mg/L para favorecer esta transformación parcial y limitar la oxidación posterior del nitrito a nitrato. De esta forma, el efluente generado contiene los dos compuestos necesarios para alimentar posteriormente el proceso anammox.

Así, la nitrificación parcial y el proceso anammox se plantean como etapas complementarias de un mismo tren de tratamiento: la primera genera el nitrito que originalmente se encuentra en bajas concentraciones en el lixiviado, mientras que la segunda utiliza ese nitrito junto con el amonio remanente para favorecer su transformación en nitrógeno gaseoso.

Ante estos desafíos, se decidió explorar el proceso anammox como una alternativa biotecnológica para la eliminación de nitrógeno. La evaluación experimental se organizó en dos etapas complementarias. La primera correspondió a una nitrificación parcial, cuyo objetivo fue transformar únicamente una fracción del amonio presente en nitrito. Para ello se trabajó con concentraciones bajas de oxígeno disuelto, inferiores a 1 mg/L, una condición que favorece la actividad de las bacterias que oxidan amonio y limita la conversión posterior del nitrito a nitrato (Wu *et al.*, 2022). La segunda etapa correspondió al proceso anammox, en el cual el amonio remanente y el nitrito generado en la etapa anterior pueden convertirse en nitrógeno gaseoso bajo condiciones sin oxígeno. Ambas etapas se estudiaron en reactores secuenciales por lotes (SBR) con un volumen operativo de 1 L. Estos sistemas funcionan mediante ciclos sucesivos de llenado, reacción, sedimentación y descarga, lo que permite controlar las condiciones de cada tratamiento.

Se emplearon cuatro reactores independientes para la etapa de nitrificación parcial (N1–N4) y cuatro para la etapa anammox (ANMX1–ANMX4). Cada reactor contó con su propio inóculo, obtenido a partir de lodos y sedimentos del sistema de almacenamiento de lixiviados del Centro de Compostaje Municipal de Xalapa y de biomasa previamente enriquecida en laboratorio. Los reactores se mantuvieron a 35 °C y con agitación constante de 150 rpm.

Durante la nitrificación parcial, los reactores se operaron inicialmente con un medio sintético que contenía 100 mg N-NH₄⁺/L. Posteriormente se incorporó progresivamente lixiviado: primero mediante una alimentación mixta, en la que el 50 % del nitrógeno amoniacal provenía del lixiviado, y finalmente utilizando lixiviado como única fuente de amonio, ajustado a 100 mg N-NH₄⁺/L. En la segunda etapa, los cuatro reactores anammox se mantuvieron bajo condiciones estrictamente anaerobias. Antes de cada ciclo se desplazó el oxígeno mediante un flujo de argón y se trabajó inicialmente con un medio mineral sintético para estabilizar la biomasa y verificar su actividad. Posteriormente se incorporó lixiviado en una proporción de 10 % v/v, con el propósito de exponer progresivamente al consorcio microbiano a la compleja composición del lixiviado y reducir el riesgo de inhibición. Cada ciclo tuvo una duración de 7 días y se monitorearon las concentraciones de amonio, nitrito, nitrato, nitrógeno molecular, pH, oxígeno disuelto, DQO y sólidos suspendidos. En conjunto, ambas etapas representan un tren de tratamiento secuencial: la nitrificación parcial permite generar el nitrito necesario para el proceso anammox, mientras que en la etapa posterior el nitrito producido y el amonio remanente pueden transformarse en nitrógeno gaseoso.

Bajo estas condiciones experimentales, la remoción de nitrógeno amoniacal dependió de la concentración inicial y del tiempo de tratamiento. Después de cuatro días de tratamiento, una concentración inicial de 150 mg N-NH₄⁺/L disminuyó hasta aproximadamente 10 mg N-NH₄⁺/L, equivalente a una remoción cercana al 93 %. Asimismo, una concentración inicial de 200 mg N-NH₄⁺/L se redujo hasta aproximadamente 20 mg N-NH₄⁺/L, correspondiente a una remoción cercana al 90 %. Con tiempos de tratamiento mayores se alcanzaron concentraciones residuales aún menores. Estos resultados corresponden específicamente a ensayos de laboratorio con lixiviado diluido.

Durante los ensayos se observaron cambios simultáneos en las formas inorgánicas de nitrógeno, caracterizados por la disminución de amonio y nitrito y la producción de nitrógeno molecular bajo condiciones anaerobias. En conjunto, estos cambios fueron consistentes con la actividad del proceso anammox. Como evidencia complementaria, al finalizar las fases 1 y 2 del proceso anammox se analizaron muestras de biomasa mediante técnicas moleculares. El ADN microbiano fue extraído y posteriormente secuenciado. Las secuencias obtenidas se procesaron mediante herramientas bioinformáticas, lo que permitió caracterizar la comunidad bacteriana y detectar microorganismos pertenecientes al género *Candidatus Brocadia*, asociado con el proceso anammox, además de otros grupos microbianos presentes en los reactores.

Entre las ventajas encontradas del proceso anammox en comparación con los métodos tradicionales de nitrificación-desnitrificación, destacan el menor consumo de oxígeno y una disminución en la generación de lodos, características que favorecen su aplicación como alternativa de tratamiento.

Estos resultados respaldan el uso potencial del proceso anammox para el tratamiento de lixiviados de RSO. Aunque aún persisten desafíos relacionados con la estabilización de los consorcios microbianos, la disponibilidad de nitrito y la optimización de los tiempos de tratamiento, los avances logrados representan un paso importante hacia la implementación de esta tecnología en escenarios reales. La investigación continuará enfocándose en la optimización del sistema y en la evaluación de su escalabilidad, con el objetivo de ofrecer alternativas para la gestión de lixiviados y contribuir al desarrollo de tecnologías más sostenibles en el ámbito del tratamiento de residuos.

Conclusiones

El tratamiento de lixiviados generados durante el compostaje de RSO representa un área de interés dentro de la biotecnología ambiental. La experiencia desarrollada con lixiviados del Centro de Compostaje Municipal de Xalapa permitió evaluar, bajo condiciones controladas de laboratorio y empleando lixiviado diluido, la viabilidad del proceso anammox para reducir las concentraciones de amonio. Los resultados obtenidos constituyen una aproximación experimental inicial y requieren su posterior evaluación con lixiviados de mayor concentración. Los avances logrados hasta ahora subrayan la importancia de seguir investigando y mejorando esta tecnología, particularmente en aspectos relacionados con la estabilidad del proceso, la disponibilidad de nitrito y su aplicación a mayor escala y en condiciones

más complejas. De esta forma, no solo se contribuye al desarrollo científico y tecnológico de México, sino que también se avanza hacia un modelo de gestión de residuos más consciente y sostenible.

Agradecimientos: Queremos expresar nuestro agradecimiento al H. Ayuntamiento de Xalapa, Veracruz por permitirnos ingresar a las instalaciones del centro de compostaje y por todas las facilidades brindadas. También al Proyecto Ciencia de Frontera del CONAHCYT (CF-2023-I-345) por el financiamiento otorgado.

Declaración de uso de IA: Durante la revisión del manuscrito se utilizó ChatGPT como herramienta de apoyo para examinar la redacción del documento. La herramienta no se utilizó para generar datos experimentales. Los autores revisaron el contenido final.

Bibliografía

- Adams, M., Xie, J., Kabore, A. J., Chang, Y., Xie, J., Guo, M., & Chen, C. (2022). Research advances in anammox granular sludge: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 52(5), 631–674. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1831358>
- Ahmad, H., Ahmad, S., Gao, L., Wang, Z., El-Baz, A., & Ni, S. (2023). Energy-efficient and carbon neutral anammox-based nitrogen removal by coupling with nitrate reduction pathways: A review. *Science of the Total Environment*, 889, 164213. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164213>
- Ali, M., & Okabe, S. (2015). Anammox-based technologies for nitrogen removal: Advances in process start-up and remaining issues. *Chemosphere*, 141, 144–153. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.06.094>
- Cao, Y., van Loosdrecht, M., & Daigger, G. (2017). Mainstream partial nitrification–anammox in municipal wastewater treatment: Status, bottlenecks, and further studies. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 101, 1365–1383. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-8058-7>
- Chen, Y., Zheng, R., Sui, Q., Ritigalaa, T., Wei, Y., Cheng, X., Ren, J., Yu, D., Chen, M., & Wang, T. (2021). Coupling anammox with denitrification in a full-scale combined biological nitrogen removal process for swine wastewater treatment. *Bioresource Technology*, 329, 124906. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124906>
- Feng, Y., Kong, L., Zheng, R., Wu, X., Zhou, J., Xu, X., & Liu, S. (2024). Adjusted bacterial cooperation in anammox community to adapt to high ammonium in wastewater treatment plant. *Water Research X*, 100258. <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2024.100258>
- Fux, C., & Siegrist, H. (2004). Nitrogen removal from sludge digester liquids by nitrification/denitrification or partial nitrification/anammox: Environmental and economical considerations. *Water Science and Technology*, 50(10), 19–26. <https://doi.org/10.2166/wst.2004.0599>
- Guo, Y., Luo, Z., Shen, J., & Li, Y. (2022). The main anammox-based processes, the involved microbes and the novel process concept from the application perspective. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 16, 84. <https://doi.org/10.1007/s11783-021-1487-1>
- Hu, K., Li, W., Wang, Y., Wang, B., Mu, H., Ren, S., Zeng, K., Zhu, H., Liang, J., Wang, Y., & Xiao, J. (2023). Novel biological nitrogen removal process for the treatment of wastewater with low carbon to nitrogen ratio: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 53, 103673. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103673>
- Jetten, M. S. M., van Niftrik, L., Strous, M., Kartal, B., Keltjens, J. T., & Op den Camp, H. J. M. (2009). Biochemistry and molecular biology of anammox bacteria. *Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology*, 44, 65–84. <https://doi.org/10.1080/10409230902722783>
- Kuenen, J. G. (2008). Anammox bacteria: From discovery to application. *Nature Reviews Microbiology*, 6(4), 320–326. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1857>
- Lackner, S., Gilbert, E. M., Vlaeminck, S. E., Joss, A., Horn, H., & van Loosdrecht, M. C. M. (2014). Full-scale partial nitrification/anammox experiences, an application survey. *Water Research*, 55, 292–303. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.02.032>
- Moreno-Quirós, R. C., Guzmán-López, O., Leal-Ascencio, M. T., Ortiz-Ceballos, Á. I., Castro-Luna, A. A., & Martínez-Hernández, S. (2025a). Characterization of organic waste from the municipal composting center of Xalapa, Veracruz, Mexico. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 12(3), e4340. <https://doi.org/10.19136/era.a12n3.4340>
- Moreno-Quirós, R. C., Ortiz-Ceballos, Á. I., & Martínez-Hernández, S. (2025b). Treatment of municipal organic waste leachates by nitrification: Analysis of the diversity and abundance of canonical and comammox microorganisms. *Environments*, 12, 479. <https://doi.org/10.3390/environments12120479>
- Wu, L., Jia, C., Huang, S., Yu, K., Luo, A., & Peng, Y. (2022). Nitrite oxidation in oxygen-deficient conditions during landfill leachate treatment. *Environmental Research*, 214, 114090. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114090>
- Wu, Y., Weng, T., Yeh, T., Chou, P., & Whang, L. (2024). Nitrogen removal strategy for real swine wastewater by combining partial nitrification-denitrification process with anammox. *Chemosphere*, 364, 143116. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143116>
- You, Q. G., Wang, J. H., Qi, G. X., Zhou, Y. M., Guo, Z. W., Shen, Y., & Gao, X. (2020). Anammox and partial denitrification coupling: A review. *RSC Advances*, 10(21), 12554–12572. <https://doi.org/10.1039/D0RA00001A>