

Aprovechamiento de los residuos de frutas y verduras para reducir la contaminación y producir bioenergía

Benny Arath de Jesús Vera-Romero ¹, Luis Alfredo Hernandez-Vasquez ², Ofelia Landeta-Escamilla ¹, Andrea Alvarado-Vallejo ¹, Raúl Snell-Castro ³, Erik Samuel Rosas-Mendoza ^{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 Departamento de Ingeniería Química, CUCEI-universidad de Guadalajara, Blvd. Marcelino García Barragán No. 1421, Guadalajara, Jalisco, 44430, México.

* Autor de correspondencia: bennyromero2@gmail.com; Tel.: (52 272 1551890).

Artículo de divulgación científica

Recibido: 31 de octubre de 2024

Aceptado: 20 de noviembre de 2024

Publicado: 23 de noviembre de 2024

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v3i1.318>

Resumen: La producción de basura en México crece cada año, lo cual sumado a una mala gestión de estos desechos tiene como consecuencia el desaprovechamiento de los residuos orgánicos. La digestión anaerobia surge como alternativa de aprovechamiento, específicamente para los desechos orgánicos, pudiendo ser convertidos en biogás (metano y dióxido de carbono). El objetivo de este trabajo es demostrar el aprovechamiento de los residuos de frutas y verduras mediante un proceso biológico (digestión anaerobia) para reducir la contaminación y producir bioenergía en forma de biogás. La eficiencia de la digestión anaerobia depende de factores como, por ejemplo, el tipo de desecho, la carga orgánica y la presencia de materiales tóxicos (compuestos nitrogenados como nitratos y aceites esenciales como el D-limoneno). Los reactores biológicos ayudan a maximizar la producción de biogás, mediante la retención del sustrato y permitiendo el crecimiento de los microorganismos involucrados en el proceso. Estudios recientes han usado diferentes desechos para mejorar la eliminación de nitrógeno y contaminantes, demostrando su eficacia para generar energía renovable a partir de desechos y reducir la contaminación. La digestión anaerobia es una alternativa sostenible para el manejo de residuos y el desarrollo de energías limpias, y su potencial aplicación industrial es prometedora.

Palabras clave: Residuos de frutas y verduras; reducción de contaminación; digestión anaerobia; reactor biológico; bioenergía.

Introducción

La generación de los RSU es una consecuencia del crecimiento económico y el aumento de la población. Las actividades diarias de las personas generan aproximadamente 102,895 toneladas diarias de residuos que deben ser gestionadas por las autoridades. En México, la forma más común de gestión de los RSU sigue siendo recolectarla y destinarla a tiraderos, lo que desperdicia materiales que podrían reutilizarse, reduciendo la necesidad de usar nuevos recursos (SEMARNAT, 2020). Debido a esto, se han buscado alternativas para resolver este problema, como la digestión anaerobia la cual es un proceso biológico donde parte de los residuos orgánicos se convierte en biogás gracias a los microorganismos involucrados en el proceso. (Lucero y Guerrero, 2021).

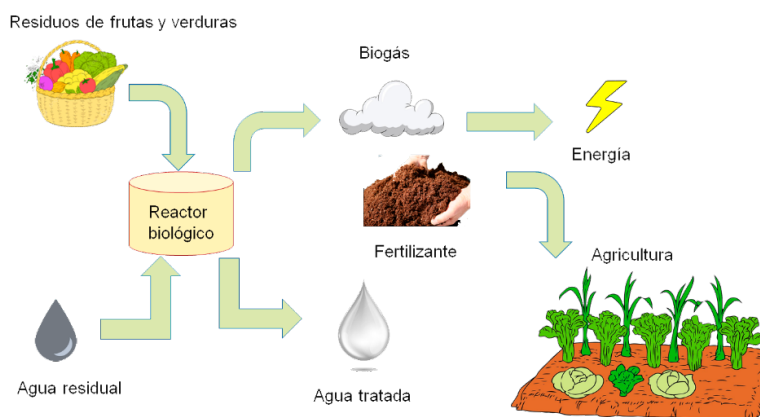


Figura 1. Aprovechamiento de residuos de frutas y verduras mediante digestión anaerobia.

El biogás está compuesto por alrededor de 60% de metano (CH_4), 38% de dióxido de carbono (CO_2) y 2% de otras impurezas (Tang *et al*, 2020). La Figura 1 muestra un ejemplo de cómo, mediante la digestión anaerobia, es posible transformar una gran cantidad de residuos orgánicos en productos útiles, como biocombustibles o fertilizantes (Benítez-Fonseca *et al*, 2020). El proceso depende del tipo de material utilizado, sin embargo, hay sustancias tóxicas que pueden detener o afectar el proceso, como los compuestos nitrogenados y aceites esenciales. Además, la eficiencia

de la digestión anaerobia depende de factores como el pH, la temperatura, la proporción entre carbono y nitrógeno, así como el tiempo que los residuos permanecen dentro del sistema, ya que estos factores pueden afectar la producción de biogás (Pan *et al*, 2023). Por otro lado, la desnitrificación es un proceso que convierte compuestos de nitrógeno como nitratos en gas, usando carbono orgánico como fuente de energía, dependiendo en parte de la relación entre carbono y nitrógeno. Existen varias fuentes de carbono, como los residuos orgánicos en aguas residuales o restos de frutas y verduras (Banda Soriano *et al*, 2022). Los reactores biológicos pueden combinar dos tipos de procesos, uno donde los microorganismos se adhieren a una superficie y otro donde los microorganismos flotan en el líquido, logrando de esta forma tratar grandes cantidades de residuos orgánicos y mejorar la distribución del alcance de los residuos, lo que ayuda a retener más sólidos y mejorar la producción de bioenergía.

Actualmente, existen investigaciones sobre cómo diferentes fuentes de carbono afectan el proceso de digestión anaerobia. Por ejemplo, Zhu *et al.* (2021) utilizaron frutas como plátano, manzana y pera para mejorar la eliminación de nitrógeno, logrando resultados muy positivos, como la eliminación de una gran parte de los contaminantes y una mejor producción de biogás. Por su parte, Wang *et al.* (2022) emplearon residuos de cáscara de plátano, obteniendo resultados similares. Por otro lado, Mudzanani *et al.* (2021) utilizaron grano gastado de cerveza como fuente de carbono, alcanzando altas remociones de nitratos. Finalmente, Suhartini *et al.* (2022) recopilaron datos sobre el uso del aceite de palma y encontraron que, después de un pretratamiento, este puede generar remociones ligeramente inferiores a las obtenidas con residuos de frutas y verduras. El estudio sobre la recolección y tratamiento de los residuos de frutas y verduras para producir biogás, mediante un reactor biológico, aporta información valiosa en los campos de las energías renovables y el desarrollo sustentable. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es demostrar el aprovechamiento de los residuos de frutas y verduras mediante un proceso biológico (digestión anaerobia) para reducir la contaminación y producir bioenergía en forma de biogás.

Desarrollo

Preparación de los residuos de frutas y verduras

La Figura 2 muestra el proceso de tratamiento de los residuos de frutas y verduras, el cual es necesario para garantizar el funcionamiento del proceso. Reducir el tamaño y triturar los residuos transforma estos residuos en una mezcla semisólida, permitiendo obtener un sustrato rico en materia orgánica. Este líquido es de suma importancia en el proceso de tratamiento biológico, ya que contiene compuestos que los microorganismos pueden digerir fácilmente para generar biogás. Asimismo, asegura que el proceso se mantenga dentro de las condiciones óptimas de operación, favoreciendo una producción eficiente de bioenergía y la eliminación de contaminantes.

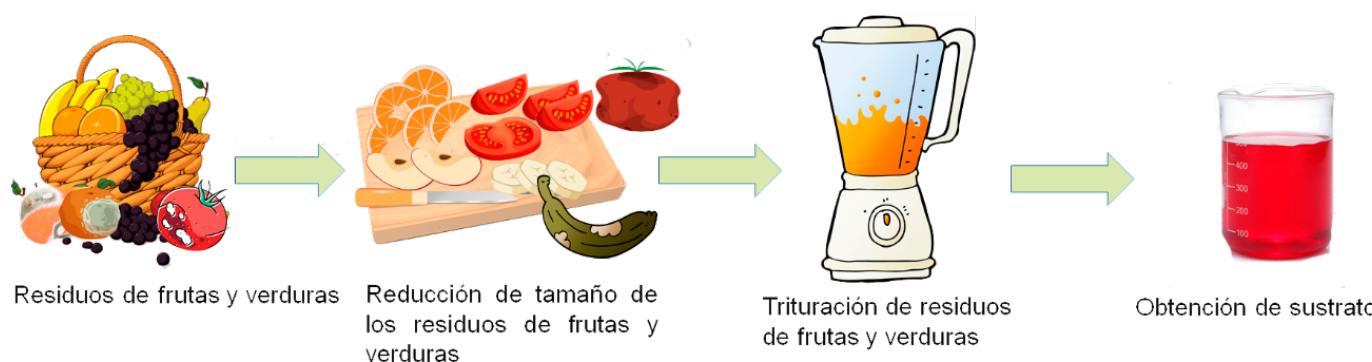


Figura 2. Acondicionamiento de los residuos de frutas y verduras para la obtención del sustrato (alimento de los microorganismos).

Utilización del reactor biológico

Los reactores biológicos, como el que se muestra en la Figura 3, son fundamentales en el proceso de digestión anaerobia. Un reactor biológico de tipo híbrido es especialmente adecuado para este proceso, ya que combina los beneficios de dos diseños diferentes: el lecho fijo y el lecho fluidizado inverso. Este tipo de reactor mejora la retención del sustrato y promueve el crecimiento de biopelículas microbianas, lo cual es crucial para la descomposición de la

materia orgánica. La aplicación de estas dos configuraciones proporciona una mayor superficie para el crecimiento de los microorganismos, lo que estabiliza el entorno dentro del reactor y favorece la producción de biogás.

Retos en el proceso de digestión anaerobia

Es muy importante hacer un seguimiento de algunos factores clave como: el pH, la Demanda Química de Oxígeno (DQO), los Sólidos Totales (ST), los Sólidos Volátiles (SV), para poder evaluar el funcionamiento del reactor biológico. Mantener el pH en los niveles correctos es esencial para que los microorganismos cumplan su función de manera eficiente (Mantoval et al, 2021). El monitoreo de la DQO permite determinar la remoción de la materia orgánica, la cual está directamente relacionado con la capacidad del reactor para generar biogás. Las mediciones de sólidos totales y sólidos volátiles indican la cantidad de materia removida, mientras que la producción de biogás indica el éxito del sistema como fuente de bioenergía. A pesar de sus beneficios los tratamientos biológicos enfrentan varios retos que pueden dificultar su eficiencia y rendimiento. La Tabla 1 presenta los principales retos que pueden surgir durante el proceso de digestión anaerobia. Las condiciones operativas pueden afectar directamente la eficiencia y estabilidad del proceso. Así como influir en su duración y continuidad, el diseño del proceso es crucial para optimizar el rendimiento del proceso de digestión anaerobia y reducir los costos operativos. Finalmente, la naturaleza de los materiales es un factor que puede impactar significativamente la eficiencia y estabilidad del proceso, ya que la concentración de los materiales tóxicos debe mantenerse en niveles seguros para evitar la inhibición microbiana y asegurar la estabilidad del reactor.

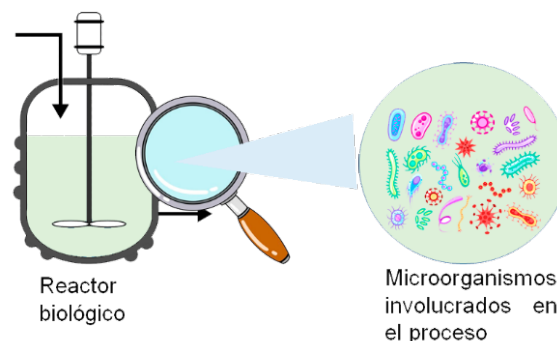


Figura 3. Reactor biológico para digestión anaerobia.

Tabla 1. Principales retos dentro del proceso de digestión anaerobia

Condiciones operativas	Diseño	Naturaleza de los materiales
Carga orgánica pH Temperatura Presión Tiempo de retención	Configuración del reactor biológico Pretratamiento	Tipo de residuos (sustrato) Residuos sólidos o residuos líquidos Contenido de materiales tóxicos

Compuestos inhibidores dentro del proceso de digestión anaerobia

Los compuestos nitrogenados afectan el tratamiento de residuos porque permiten que ciertos microorganismos utilicen la fuente de carbono disponible, en otro proceso llamado desnitrificación, en el que bacterias transforman los compuestos nitrogenados en nitrógeno en forma de gas, eliminando así el exceso de compuestos de nitrógeno en el agua (Owaes et al, 2024). Este proceso ayuda a reducir el nitrógeno, sin embargo; tiene varias desventajas incluido el alto consumo de energía y la necesidad de una cantidad elevada de materia orgánica, esto puede entorpecer la producción de metano, debido a que las bacterias que los eliminan compiten con otro grupo de microorganismos por el carbono, afectando la eficiencia del reactor (Shigei et al, 2024). Por otro lado, los residuos cítricos contienen un aceite de origen natural (D-limoneno) que se encuentra principalmente en la cáscara de los cítricos y es responsable de su característico aroma. Este aceite es ampliamente utilizado en diversas industrias debido a sus propiedades desengrasantes, su fragancia y su efecto bactericida y fungicida (Johnravindar et al, 2021). No obstante, el D-limoneno puede tener efectos negativos, ya que en concentraciones elevadas resulta tóxico para ciertos microorganismos que son fundamentales en el proceso de digestión anaerobia, lo cual puede dificultar la producción de biogás, reduciendo la eficiencia del reactor (Jegade et al, 2019).

Caso de estudio de la producción de biogás y eliminación de contaminantes

Se trataron los residuos de frutas y verduras obtenidos del mercado Emiliano Zapata, ubicado en la localidad de Orizaba, Veracruz. El proceso de digestión anaerobia requiere un tiempo de acondicionamiento, durante el cual la producción

de biogás es baja debido a la estabilización del pH y de los microorganismos. Durante un periodo de 90 días, la eliminación de carbono (C), la demanda química de oxígeno alcanzó un 90% de remoción, y en la eliminación de carbono y nitrógeno (C-N), alcanzó un 95% de remoción de DQO. La eliminación de nitratos fue superior al 90-92%. La producción de biogás durante la eliminación de carbono se mantuvo estable con 5 L/día bajo condiciones estándar de temperatura y presión, mientras que durante la eliminación de C-N se redujo muy ligeramente. La actividad dentro del reactor biológico es adecuada para eliminar tanto carbono como carbono y nitrógeno, lo que contribuye a una estrategia de bioenergía sostenible. Los resultados obtenidos durante el estudio se muestran en la Figura 4.

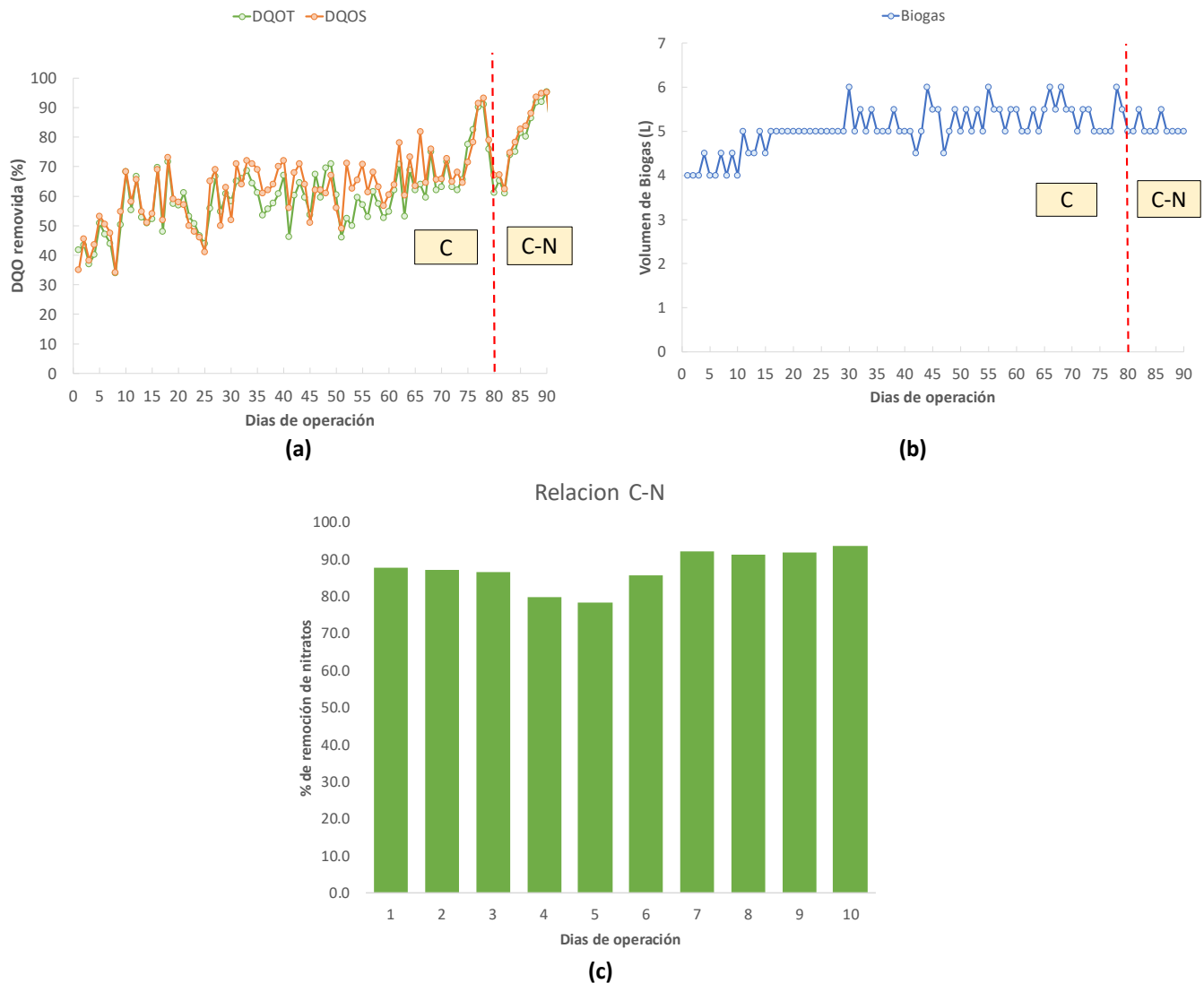


Figura 4. Resultados del caso de estudio: a) Remoción de DQO, b) Producción de biogás, c) Remoción nitratos.

Implicaciones futuras y tendencias del sector de bioenergía

Este estudio destaca el uso de los residuos de futas y verduras como fuente de carbono en procesos de digestión anaerobia, y puntualiza las nuevas tecnologías en la gestión de residuos y la producción de energía renovable. El enfoque en la fracción líquida de los residuos podría maximizar el aprovechamiento de los residuos, mientras que la alta eficiencia en la eliminación de materia orgánica y la producción de biogás indican que esta tecnología puede ser implementada a mayor escala. Con el creciente interés mundial en tecnologías que promuevan la sostenibilidad, investigaciones como esta ayudan a desarrollar un futuro donde el manejo responsable de residuos y la generación de energía limpia van de la mano. Mejorar el diseño de los reactores y explorar el uso de diversos residuos podría optimizar la eficiencia y ampliar el uso de esta tecnología en áreas como el tratamiento de efluentes industriales o la producción de bioenergía.

Conclusiones

El estudio sobre la recolección y tratamiento de residuos de frutas y verduras para la producción de biogás mediante digestión anaerobia demuestra el potencial de esta tecnología para convertir residuos de frutas y verduras en energía renovable, contribuyendo a la reducción de contaminación y al aprovechamiento de recursos naturales. La implementación de un reactor biológico híbrido permite una mejor retención de sólidos y promueve el crecimiento microbiano, optimizando la producción de biogás. A pesar de los desafíos asociados, como las condiciones ambientales y la toxicidad de ciertos compuestos, los resultados evidencian una alta eficiencia en la eliminación de contaminantes alcanzando un 95% en la remoción de DQO y una eliminación de nitratos superior al 90%, la generación de biogás se mantuvo en 5 L/día bajo condiciones estándar de temperatura y presión. Este enfoque representa una opción viable y sostenible para el manejo de residuos, con implicaciones positivas para el desarrollo de energías limpias y la gestión de residuos, y sugiere un futuro prometedor para su aplicación a mayor escala en la industria de bioenergía.

Agradecimientos y financiamiento: Proyecto autorizado por TecNM con clave ORIZ-PYR-2024-20566 en la convocatoria 2024 "Proyectos de Investigación Científica, Desarrollo Tecnológico e Innovación, para los Institutos Tecnológicos Federales, Descentralizados y Centros del Tecnológico Nacional de México".

Bibliografía

- Banda-Soriano, Y., Oltehua-López, T., Anne-Claire, F. de M., & Cuervo-López, M. (2022). Biodegradación de antibióticos por desnitrificación y efectos sobre la fisiología, cinética y comunidades microbianas desnitrificantes. *Hidrobiológica*, 32 (1), 59-70, <https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbh/hidro/2022v32n1/banda>.
- Benítez-Fonseca, M., Abafos-Rodríguez, A., Rodríguez-Pérez, S., & Ramírez-Vives, F. (2020). Co-digestión anaerobia de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos y su lixiviado. *Revista Colombiana de Biotecnología*, XXII (2), 70-81, <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v22n2.70345>.
- Jegede, A. O., Zeeman, G., & Bruning, H. (2019). A review of mixing, design and loading conditions in household anaerobic digesters. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 49 (22), 2117–2153, <https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1607441>.
- Johnravindar, D., Patria, R. D., Lee, J. T. E., Zhang, L., Tong, Y. W., Wang, C. H., & Kaur, G. (2021). Syntrophic interactions in anaerobic digestion: how biochar properties affect them?. *Sustainable Environment*, 7(1), <https://doi.org/10.1080/27658511.2021.1945282>.
- Lucero, M. J., & Guerrero, L. (2021). TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE RESIDUOS AGRÍCOLAS POR DIGESTIÓN ANAEROBIA Y NITRIFICACIÓN – DESNITRIFICACIÓN. *Revista AIDIS De ingeniería Y Ciencias Ambientales: Investigación, Desarrollo Y práctica*, 14(3), 978–996, <https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2021.14.3.75127>.
- Mantovan, F. M., Zenatti, D. C., & Burin, E. L. K. (2021). Effect of Agitation on Anaerobic Co-Digestion of Swine Manure and Food Waste. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2021200102>.
- Mudzanani, K., van Heerden, E., Mbhele, R., & Daramola, M. (2021). Enhancement of biogas production via co digestion of wastewater treatment sewage sludge and brewery spent grain: physicochemical characterization and microbial community. *Sustainability*, 13(8225), <https://doi.org/10.3390/su13158225>.
- Owaes, M., Gani, K. M., Kumari, S., Seyam, M., & Bux, F. (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>.
- Pan, H., Feng, Q., Zhao, Y., Li, X., & Zi, H. (2023). Influence of Organic Loading Rate on Methane Production from Brewery Wastewater in Bioelectrochemical Anaerobic Digestion. *Fermentation*, 9(11), 932, <https://doi.org/10.3390/fermentation9110932>.
- Shigei, M., Herbert, R. B., Persson, F., Sokolova, E., & Dalahmeh, S. S. (2024). Efficient removal of organic matter and nitrogen from municipal wastewater in multi-module biochar filters for onsite wastewater treatment. *Environmental Technology*, 1–13, <https://doi.org/10.1080/09593330.2024.2402096>.
- Simeonov, I., & Hubenov, V. (2024). ANAEROBIC CO-DIGESTION OF DIFFERENT MIXTURES OF ORGANIC WASTES – OUR EXPERIENCE. *Ecological Engineering and Environment Protection*, (06), 54-64, <https://doi.org/10.32006/eeep.2024.1.5464>.
- Suhartini, S., Hidayat, N., Rohma, N. A., Paul, R., Pangestuti, M. B., Utami, R. N., & Melville, L. (2022). Sustainable strategies for anaerobic digestion of oil palm empty fruit bunches in Indonesia: a review. *International Journal of Sustainable Energy*, 41(11), 2044–2096, <https://doi.org/10.1080/14786451.2022.2130923>.
- SEMARNAT. (2020). Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos 2020. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/prevencion-y-gestion-integral-de-los-residuos>.
- Tang, B., He, M., Dong, Y., Liu, J., Zhao, X., Wang, C., & Zhang, W. (2020). Effects of different forms of vegetable waste on biogas and methane production performances in a batch anaerobic digestion reactor. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1–11, <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1818003>.
- Zhu, Z., Zhao, Y., Guo, Y., Zhang, R., Pan, Y., & Zhou, T. (2021). A novel additional carbon source derived from rotten fruits: Application for the denitrification from mature landfill leachate and evaluation the economic benefits. *Bioresource Technology*, 334, 125244, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125244>.
- Wang, N. X., Lu, X. Y., Tsang, Y. F., Mao, Y., Tsang, C. W., & Yueng, V. A. (2022). A comprehensive review of anaerobic digestion of organic solid wastes in relation to microbial community and enhancement process. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, <https://doi.org/10.1002/jsfa.11719>.