

Conversión de Lixiviados en Catalizadores Heterogéneos para la Producción de Biodiésel

Mariana López-Guerrero ¹, Ma. del Rosario Moreno-Virgen ^{1,*}, Hilda Elizabeth Reynel-Ávila ^{1,2}, Didilia Ileana Mendoza-Castillo ^{1,2}, Adrián Bonilla-Petriciolet ¹, Ana P. Melchor-Durán ¹

¹ Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Aguascalientes, 20256, México.

² Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, Ciudad de México, 03940, México.

* Autor de correspondencia: ma_rosario.mv@aguascalientes.tecnm.mx; Tel.: (4499105002)

Artículo de divulgación científica

Recibido: 14 de abril de 2026

Aceptado: 6 de julio de 2026

Publicado: 25 de julio de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i2.708>

Resumen: Los lixiviados generados en los rellenos sanitarios constituyen un residuo líquido de composición compleja cuyo manejo representa un importante desafío ambiental debido a la presencia de compuestos orgánicos, inorgánicos y metales potencialmente tóxicos. Tradicionalmente, la investigación se ha centrado en su tratamiento y disposición; sin embargo, en los últimos años ha surgido un creciente interés por desarrollar estrategias de valorización basadas en los principios de la economía circular. Entre ellas destaca la obtención de materiales con propiedades catalíticas. En este trabajo se propone el aprovechamiento de lixiviados mediante su valorización para la obtención de materiales con potencial catalítico para la producción de biodiésel. A partir de un caso de estudio desarrollado con lixiviados provenientes de un relleno sanitario, se muestra cómo estos efluentes pueden emplearse como precursores para la obtención de materiales capaces de favorecer la reacción de transesterificación. Los resultados obtenidos evidencian el potencial de los lixiviados como fuente de materiales de valor agregado y resaltan la importancia de impulsar estrategias de recuperación de recursos que integren la valorización de residuos, la producción de biocombustibles y los principios de la economía circular.

Palabras clave: catalizador, lixiviado, relleno sanitario, sostenibilidad, economía circular, biodiésel, valorización de residuos

Introducción

A simple vista, un relleno sanitario parece ser únicamente un lugar donde se deposita la basura. Sin embargo, debajo de la superficie ocurre una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que continúan transformando los residuos durante años. Uno de los más importantes tiene lugar cada vez que llueve, debido a que el agua se infiltra a través de las distintas capas de residuos y, durante su recorrido, disuelve y arrastra materia orgánica, sales minerales, nutrientes, metales y una amplia variedad de compuestos químicos. Como resultado se genera un líquido oscuro conocido como lixiviado.

Aunque este término resulta poco familiar para gran parte de la población, los lixiviados constituyen uno de los mayores desafíos ambientales asociados con la disposición final de los residuos sólidos urbanos. Su elevada carga de contaminantes hace que, si no son recolectados y tratados adecuadamente, puedan infiltrarse en el suelo o alcanzar cuerpos de agua superficiales y acuíferos, comprometiendo la calidad del agua y la integridad de los ecosistemas (Ayisi *et al.*, 2022; Siddiqua *et al.*, 2022; Huang *et al.*, 2023; Wu *et al.*, 2024).

Durante décadas, la investigación científica se ha centrado en desarrollar tecnologías para tratar y controlar los lixiviados, con el objetivo de reducir su impacto ambiental. Sin embargo, en los últimos años ha surgido una nueva forma de ver este problema. En lugar de considerar los lixiviados únicamente como un residuo que debe tratarse, diversos estudios han comenzado a explorar su valorización, es decir, su aprovechamiento como fuente de materiales o productos con valor agregado. Esta visión se alinea con los principios de la economía circular, cuyo objetivo es mantener los recursos en uso durante el mayor tiempo posible mediante su reincorporación en nuevos procesos productivos (Wei *et al.*, 2023).

Esta nueva perspectiva ha abierto la posibilidad de aprovechar los compuestos presentes en los lixiviados para obtener materiales con aplicaciones tecnológicas. Entre las alternativas más prometedoras se encuentra la síntesis de catalizadores heterogéneos a partir de los compuestos presentes en los lixiviados, los cuales pueden recuperarse y reutilizarse con relativa facilidad, lo que los convierte en una opción atractiva para procesos industriales y ambientales con un menor impacto ambiental (Maroa & Inambao, 2021; Hua *et al.*, 2025).

Una de las aplicaciones más atractivas de estos catalizadores es la producción de biodiésel, un biocombustible renovable obtenido mediante la transesterificación de aceites o grasas con alcoholes. El empleo de catalizadores heterogéneos favorece este proceso al facilitar la recuperación y reutilización del material catalítico, además de reducir la generación de residuos (Estevez *et al.*, 2019; Christopher *et al.*, 2025).

La Figura 1 muestra cómo un residuo que tradicionalmente ha sido considerado un problema ambiental puede convertirse en una fuente de materiales funcionales con aplicaciones en procesos sostenibles, como la producción de biodiésel. Bajo esta perspectiva, el presente trabajo tiene como objetivo divulgar el potencial de los lixiviados de rellenos sanitarios como precursores para la obtención de catalizadores heterogéneos, destacando cómo su valorización puede contribuir simultáneamente a la gestión sostenible de residuos y al desarrollo de tecnologías para la producción de biocombustibles.



Figura 1. Esquema conceptual de la valorización de lixiviados para la obtención de catalizadores heterogéneos empleados en la producción de biodiésel.

Desarrollo

Gran parte de los productos que utilizamos diariamente, desde medicamentos hasta combustibles, requieren reacciones químicas para su fabricación. Sin embargo, muchas de estas reacciones ocurren lentamente o demandan elevadas cantidades de energía. Para resolver este problema se utilizan catalizadores, que son materiales que permiten acelerar una reacción química sin consumirse durante el proceso, esto significa que, pueden participar en la reacción, facilitarla y luego recuperarse sin sufrir cambios permanentes (Zhang & Zhang, 2024). Gracias a esta propiedad, muchas transformaciones químicas pueden realizarse en menos tiempo, con menor consumo de energía y bajo condiciones más controladas de operación, lo que los convierte en elementos esenciales en la industria química moderna.

En términos generales, existen dos tipos de catalizadores que pueden clasificarse según la fase en la que se encuentran respecto a los reactivos. Los catalizadores homogéneos están disueltos en la misma fase que las sustancias que reaccionan, lo que permite una alta eficiencia de contacto, aunque dificulta su separación posterior. En contraste, los catalizadores heterogéneos se encuentran en una fase diferente, normalmente como sólidos en contacto con líquidos o gases, lo que facilita su recuperación y reutilización (Isahak & Al-Amiery, 2024). Esta última característica ha impulsado un creciente interés en el desarrollo de catalizadores heterogéneos más sostenibles, especialmente aquellos obtenidos a partir de materiales alternativos o residuos industriales. Este enfoque no solo reduce costos de producción, sino que también se integra dentro de estrategias de economía circular y valorización de desechos.

Por otra parte, el biodiésel es un combustible renovable que puede obtenerse a partir de aceites vegetales o grasas, mediante una reacción química conocida como transesterificación. Durante este proceso, los triglicéridos presentes en los aceites reaccionan con un alcohol, generalmente metanol, para formar una mezcla de ésteres conocida como biodiésel y glicerol como subproducto. La eficiencia de esta reacción depende de diversos factores, entre ellos la temperatura, la proporción entre reactivos y el tipo de catalizador utilizado. El esquema general de este proceso de transesterificación se muestra en la Figura 2.

Este combustible representa una alternativa al diésel convencional derivado del petróleo, ya que puede utilizarse en motores diésel con pocas o ninguna modificación, además de presentar ventajas ambientales importantes como la reducción de emisiones de gases contaminantes, partículas y compuestos aromáticos.

No obstante, la sostenibilidad del biodiésel depende principalmente del origen de la materia prima utilizada para producirlo. Por ello, actualmente se clasifica en diferentes generaciones de acuerdo con el tipo de recurso empleado (Figura 3).

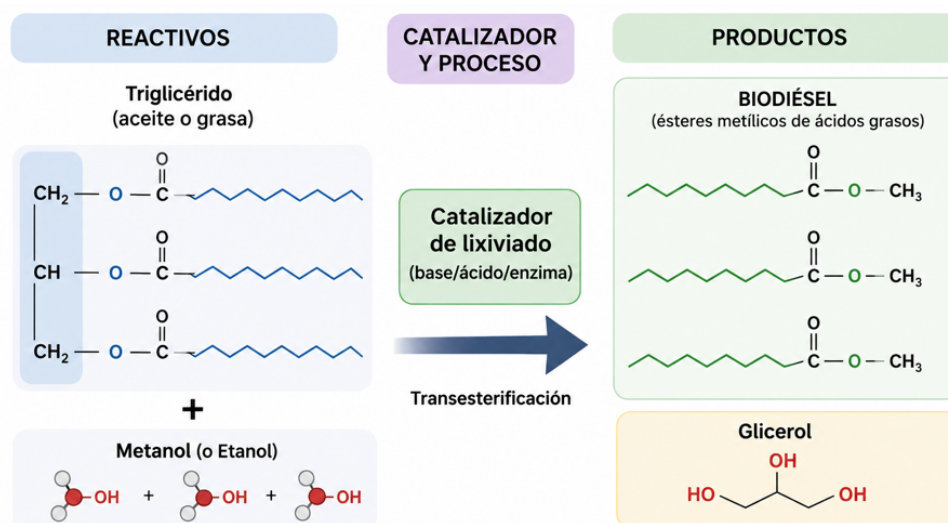


Figura 2. Esquema general del proceso de transesterificación para la producción de biodiésel a partir de triglicéridos.



Figura 3. Materias primas empleadas para la generación de biodiésel, ventajas y desventajas.

Nota: Adaptado de Singh *et al.* (2020).

En la actualidad existe un interés creciente por desarrollar biodiésel de segunda y tercera generación empleando catalizadores heterogéneos, debido a que esta estrategia representa una de las rutas más prometedoras dentro de la transición energética, ya que permite integrar la valorización de residuos con la producción de combustibles más limpios y evitan competir con la producción de alimentos y favorecen además el aprovechamiento integral de los residuos.

La economía circular propone cambiar la forma tradicional de gestionar los residuos. En lugar de eliminarlos después de su uso, busca reincorporarlos a nuevos procesos productivos. Siguiendo esta filosofía, los lixiviados de rellenos

sanitarios representan una oportunidad para recuperar materiales que normalmente permanecerían sin aprovechamiento. Aunque tradicionalmente se consideran un problema ambiental, su composición química permite recuperar una fracción sólida susceptible de transformarse en materiales funcionales. Con el propósito de explorar alternativas para el aprovechamiento de residuos, se evaluó el potencial de los lixiviados generados en el relleno sanitario de San Nicolás, Aguascalientes, como materia prima para la obtención de materiales con aplicaciones catalíticas.

El lixiviado utilizado en este caso de estudio fue recolectado en el relleno sanitario de San Nicolás, ubicado en el estado de Aguascalientes, México. La Figura 4 muestra una vista general del sitio de estudio, así como un diagrama de bloques que representa la estructura general del sitio donde fue realizado el muestreo de los lixiviados.

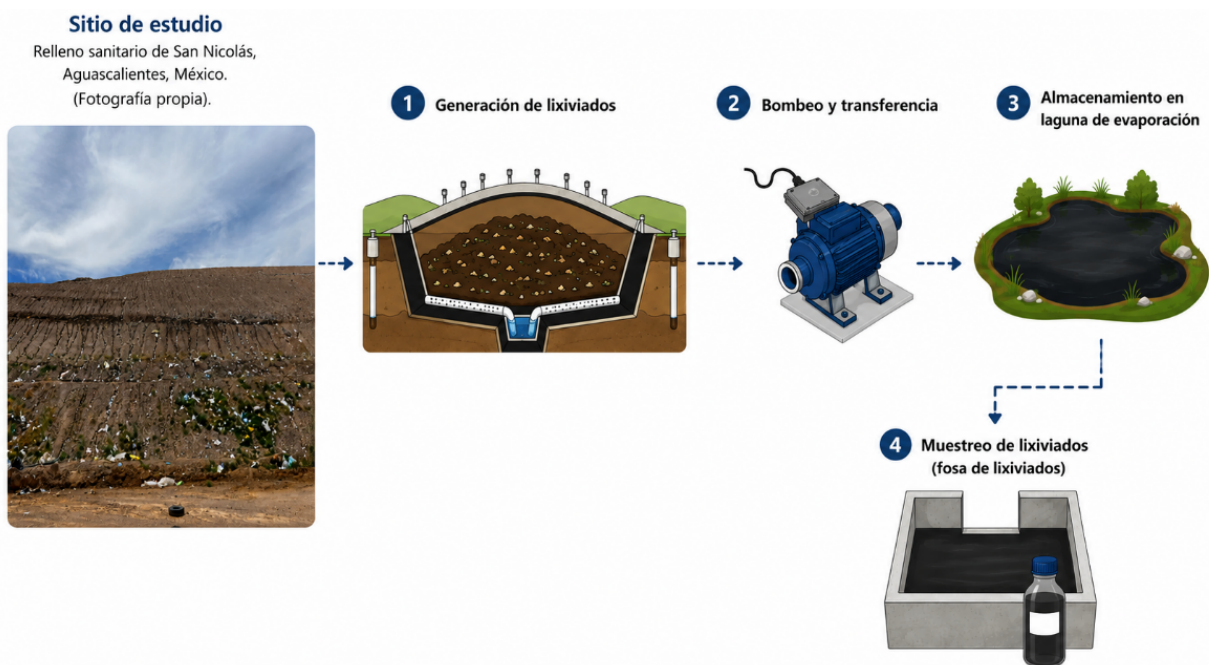


Figura 4. Esquema del proceso de obtención de muestras de lixiviado desde el relleno sanitario hasta su almacenamiento para posterior valorización como materia prima en la síntesis de materiales catalíticos.

El lixiviado recolectado fue sometido a una serie de etapas de acondicionamiento y transformación con el objetivo de recuperar un material sólido y modificar sus propiedades con el propósito de evaluar su potencial como material catalítico. Posteriormente, el material obtenido fue aplicado en la reacción de transesterificación para la producción de biodiésel, evaluando su desempeño bajo diferentes condiciones de operación. La Figura 5 resume el proceso general de valorización propuesto en este caso de estudio.

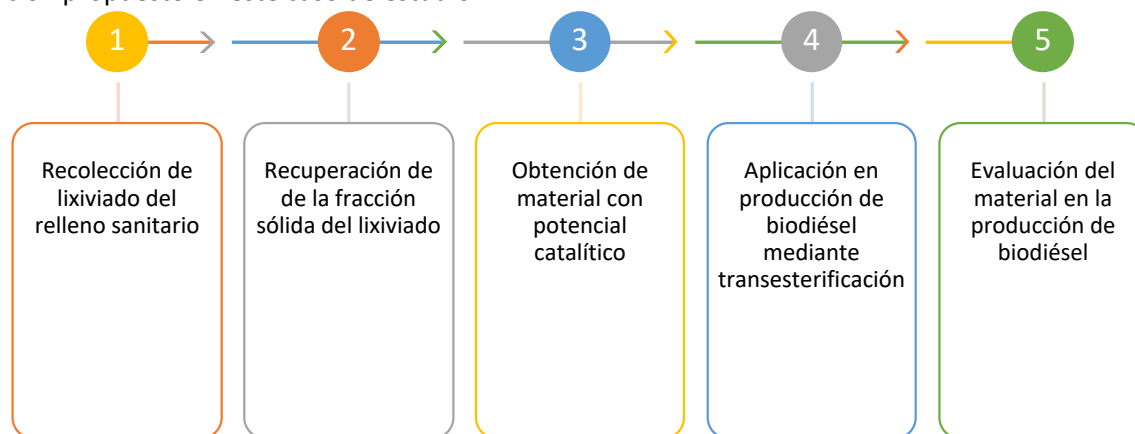


Figura 5. Esquema general del proceso de valorización de lixiviados de relleno sanitario mediante la obtención de un material con potencial catalítico y su aplicación en la producción de biodiésel.

Para mostrar el potencial de esta propuesta, se desarrolló un caso de estudio utilizando lixiviados provenientes del relleno sanitario de San Nicolás, Aguascalientes. Tras su acondicionamiento y tratamiento térmico, se obtuvo un material sólido cuyo potencial como catalizador heterogéneo fue explorado en la producción de biodiésel mediante la reacción de transesterificación. Como parte del caso de estudio, el material obtenido mostró potencial para favorecer la reacción de transesterificación.

En el caso de estudio, se identificó que la relación aceite/metanol tuvo una mayor influencia sobre el desempeño del proceso con respecto a un incremento en la cantidad de catalizador. Esto pone de manifiesto que el desempeño del proceso depende tanto de las condiciones de reacción como de las características del material obtenido.

Las principales observaciones derivadas del caso de estudio se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Principales hallazgos obtenidos a partir del caso de estudio

Aspecto evaluado	Hallazgo principal
Obtención del material	Se recuperó una fracción sólida del lixiviado.
Aplicación catalítica	El material mostró actividad durante la reacción de transesterificación, lo que permite explorar su potencial como material catalítico empleado para producir biodiésel.
Condiciones de reacción	La relación aceite/metanol presentó mayor influencia sobre el desempeño del proceso.
Concentración de catalizador	El incremento en la cantidad de catalizador no produjo mejoras proporcionales en el desempeño de la reacción.
Aprovechamiento del residuo	El lixiviado representa una fuente alternativa para la obtención de materiales funcionales de valor agregado.

Desde un enfoque de economía circular, este caso de estudio muestra la posibilidad de transformar un residuo complejo como el lixiviado en un material con potencial para aplicaciones energéticas. Sin embargo, aún son necesarios estudios sobre la caracterización del material, su estabilidad y su capacidad de reutilización antes de considerar su aplicación a mayor escala.

Conclusiones

Los lixiviados generados en los rellenos sanitarios representan una corriente residual compleja cuya gestión constituye un desafío ambiental. Sin embargo, los resultados obtenidos muestran que su fracción inorgánica puede aprovecharse para obtener materiales con potencial aplicación catalítica en la producción de biodiésel, lo que evidencia una alternativa de valorización alineada con los principios de la economía circular. No obstante, este potencial debe considerarse preliminar, ya que la evidencia disponible proviene de estudios a escala de laboratorio.

Para avanzar hacia una aplicación práctica, será necesario optimizar la síntesis y caracterización de estos materiales, así como evaluar su estabilidad, reutilización y viabilidad técnica, económica y ambiental. En conjunto, esta estrategia muestra que los lixiviados pueden pasar de ser un pasivo ambiental a una fuente potencial de materiales de valor agregado para el desarrollo de tecnologías más sostenibles.

Una de las principales limitaciones de este trabajo es que el material obtenido no fue sometido a una caracterización fisicoquímica detallada. En consecuencia, la actividad catalítica observada constituye una evaluación preliminar y será necesario realizar estudios posteriores que permitan determinar su composición, propiedades superficiales y mecanismos de actuación como catalizador.

Bibliografía

- Ayisi, P. A., Ngonda, T., & Kanyarusoke, K. (2022). Current landfill technologies and the prospects of developing landfill-based biogas generators for African countries. *Materials Today: Proceedings*, 56, 1865–1871. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.055>
- Christopher, S. D., Devarajan, Y., & Raja, T. (2025). Sewage sludge as a sustainable feedstock for biodiesel: Advances in conversion technologies and catalytic applications. *Results in Engineering*, 25, 104000. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104000>
- Estevez, R., Aguado-Deblas, L., Bautista, F. M., Luna, D., Luna, C., Calero, J., Posadillo, A., & Romero, A. A. (2019). Biodiesel at the crossroads: A critical review. *Catalysts*, 9(12), 1033. <https://doi.org/10.3390/catal9121033>
- Hua, J., Ji, M., Jiao, P., Yin, Z., Xia, Q., Jiang, L., Zhang, J., & Pan, H. (2025). Heterogeneous acid catalysts for biodiesel production: Effect of physicochemical properties on their activity and reusability. *Catalysts*, 15(4), 396. <https://doi.org/10.3390/catal15040396>
- Huang, Y., Guan, Z., & Xia, D. (2023). Effective remediation of leachate concentrate by peroxymonosulfate in a catalytic ceramic membrane filtration process: Performance and mechanism. *Waste Management*, 172, 117–126. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.10.028>
- Isahak, W. N. R. W., & Al-Amiery, A. (2024). Catalysts driving efficiency and innovation in thermal reactions: A comprehensive review. *Green Technologies and Sustainability*, 2(2), 100078. <https://doi.org/10.1016/j.grets.2024.100078>
- Maroa, S., & Inambao, F. (2021). A review of sustainable biodiesel production using biomass-derived heterogeneous catalysts. *Engineering in Life Sciences*, 21(12), 790–824. <https://doi.org/10.1002/elsc.202100025>
- Siddiqua, A., Hahladakis, J. N., & Al-Attiya, W. A. K. A. (2022). An overview of the environmental pollution and health effects associated with waste landfilling and open dumping. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(39), 58514–58536. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21578-z>
- Singh, D., Sharma, D., Soni, S. L., Sharma, S., Kumar Sharma, P., & Jhalani, A. (2020). A review on feedstocks, production processes, and yield for different generations of biodiesel. *Fuel*, 262, 116553. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116553>
- Wei, T., Zhao, B., Zhou, Z., Di, H., Shumba, T., Cui, M., Zhou, Z., Xu, X., Qi, M., Tang, J., Ndungu, P. G., Qiao, X., & Zhang, Z. (2023). Removal of organics and ammonia in landfill leachate via catalytic oxy-pyrolysis over MOF-derived Fe₂O₃@SiO₂-Al₂O₃. *Separation and Purification Technology*, 305, 122467. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122467>
- Wu, Y., Li, W., Yin, J., Gao, Y., Zhang, Q., Sun, Y., Gao, W., Lu, J., Huang, Q., Bian, R., Wang, Y., & Wang, H. (2024). Influence of intruding organic acids on the leaching dynamics of heavy metals in stabilized MSWI fly ash from landfills under various percolation conditions. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(6), 114557. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114557>
- Zhang, W., & Zhang, S. (2024). Catalysts: Materials. En *Encyclopedia of Condensed Matter Physics* (pp. 738–749). <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90800-9.00202-X>