

Evaluation and Kinetic Modeling of Anaerobic Reactors for Leachate Treatment *Evaluación y modelado cinético de reactores anaeróbicos para el tratamiento de lixiviados*

Julio Isaac Maldonado Maldonado ^a; Jorge Luis Ortiz Carrillo ^b

^a Ph.D. Ingeniero Civil. Programa de Ingeniería Ambiental. Facultad de Ingenierías y Arquitectura. Universidad de Pamplona. e-mail: jimaldonadom@unipamplona.edu.co. Enlace ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5956-59>

^b McS. Jorge Luis Ortiz Carrillo. Microbiólogo. Programa de Ingeniería Ambiental. Facultad de Ingenierías y Arquitectura. Universidad de Pamplona. jorge.ortiz@unipamplona.edu.co. Enlace ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0807-8091>.

Corresponding author: jorge.ortiz@unipamplona.edu.co

Submitted: 22-02, 2025. **Accepted:** 22-05, 2025.

Resumen

Este estudio evalúa la eficacia de los sistemas DI-FAFS (dos etapas) y TRI-FAFS (tres etapas) para tratar lixiviados de rellenos sanitarios (LRS), comparándolos con reactores como biodisco (RBC), filtro percolador (FP) y UASB. Los resultados demostraron que TRI-FAFS logró la mayor eficiencia en remoción de DQO (85%-95%), seguido de DI-FAFS (70%-85%), gracias a su configuración escalonada que optimiza la degradación de compuestos recalcitrantes y reduce la inhibición metabólica. Se aplicaron cargas de DQO entre 12–25 g/m²-día (RBC) y hasta 18.65 kg/m³-día (UASB), bajo condiciones controladas de pH (8–9) y temperatura (18–34 °C). Los modelos cinéticos desarrollados describieron con precisión la degradación de sustratos y la producción de metano, destacando la influencia de la temperatura en la actividad microbiana y la generación estable de biomasa (100–102 UFC/mL/h) y metano (10⁻² mg/d por mg/L/h). La caracterización microbiana en TRI-FAFS reveló una distribución funcional por etapas: bacterias hidrolíticas y acidogénicas en la

Abstract

This study evaluates the effectiveness of DI-FAFS (two-stage) and TRI-FAFS (three-stage) systems for treating landfill leachate (LFL), comparing them with reactors such as rotating biological contactor (RBC), trickling filter (TF), and UASB. The results showed that TRI-FAFS achieved the highest COD removal efficiency (85%-95%), followed by DI-FAFS (70%-85%), due to its staged configuration, which enhances the degradation of recalcitrant compounds and reduces metabolic inhibition. COD loads ranged from 12–25 g/m²-day (RBC) to 18.65 kg/m³-day (UASB), under controlled pH (8–9) and temperature (18–34 °C) conditions. The developed kinetic models accurately described substrate degradation and methane production, highlighting the influence of temperature on microbial activity and the stable generation of biomass (100–102 CFU/mL/h) and methane (10⁻² mg/d per mg/L/h). Microbial characterization in TRI-FAFS revealed a functional stage-wise distribution: hydrolytic and acidogenic bacteria in the first stage, acidogenic and acetogenic bacteria

primera, acidogénicas y acetogénicas en la segunda, y metanogénicas en la tercera. Esta progresión mejoró la solubilización de contaminantes y la estabilidad del sistema. En conclusión, los sistemas multietapa (DI-FAFS y TRI-FAFS) son alternativas viables y sostenibles para LRS complejos, superando a reactores convencionales. Su diseño favorece la adaptación microbiana, maximiza la biodegradación y ofrece un marco para optimizar reactores anaeróbicos mediante modelos cinéticos. Este trabajo resalta el potencial de la tecnología escalonada en el tratamiento de lixiviados, combinando eficiencia operativa y sostenibilidad ambiental.

Palabras clave: Lixiviados; Reactores anaeróbicos; Microorganismos; Degradación de materia orgánica; Producción de metano.

in the second, and methanogens in the third. This progression improved contaminant solubilization and system stability. In conclusion, multistage systems (DI-FAFS and TRI-FAFS) are viable and sustainable alternatives for complex LFL, outperforming conventional reactors. Their design promotes microbial adaptation, maximizes biodegradation, and provides a framework for optimizing anaerobic reactors through kinetic modeling. This work underscores the potential of staged technology in leachate treatment, combining operational efficiency and environmental sustainability.

Keywords: Leachates; Anaerobic reactors; Microorganisms; Degradation of organic matter; Methane production.

1. Introducción

El desarrollo de biomasa en un sistema destinado al tratamiento de lixiviados de vertedero está influenciado por la biodegradabilidad de estos residuos líquidos, la cual cambia con el tiempo en función[1]. Los lixiviados son un líquido residual generado al filtrarse agua a través de los residuos sólidos municipales. La demanda química de oxígeno (DQO) del lixiviado disminuye a medida que aumenta la antigüedad del vertedero, evidenciando una relación inversa[2]. Este líquido contiene sustancias químicas peligrosas, como halógenos, fenoles, metales pesados, amoníaco y compuestos aromáticos[3]. Además, la presencia de sólidos suspendidos y microorganismos patógenos puede intensificar los riesgos ambientales, especialmente cuando el lixiviado se infiltra en aguas superficiales y subterráneas[4], por lo que deben ser sometidos a un tratamiento previo antes de ser descargados al medio ambiente. No obstante los altos valores respecto a costos y la presencia de materia recalcitrante hace que las herramientas o técnicas convencionales tengan un bajo impacto en cuanto a un óptimo tratamiento[5], es así como los recientes avances en procesos biológicos incluyen a los reactores anaeróbicos de biomasa fija y suspendida, los filtros anaeróbicos

de flujo ascendente (FAFS) y los reactores de manto de lodos, destacan por su eficiencia en la remoción de DQO y la producción de biogás. Estos sistemas permiten la colonización y actividad de microorganismos especializados, como bacterias hidrolíticas, acidogénicas y metanogénicas, que trabajan en sinergia para descomponer compuestos complejos y generar metano (Maldonado-Maldonado et al., 2024). La evaluación de las tasas de utilización de sustratos orgánicos es fundamental para diseñar y optimizar estos reactores. Modelos matemáticos, basados en la cinética de crecimiento microbiano, permiten prever el rendimiento del proceso bajo diferentes condiciones operativas [7]. Estudios recientes han demostrado que la temperatura, el pH y la estructura de los compuestos influyen significativamente en la eficiencia del sistema y en la dinámica de las comunidades microbianas (Zhao et al., 2022; Maldonado-Maldonado et al., 2024). En este estudio donde se evaluaron las tasas de utilización de sustratos orgánicos contenidos en Lixiviados de Relleno Sanitarios (LRS) en reactores de biomasa fijas y de biomasa suspendida. Se diseñaron construyeron y probaron cinco biorreactores para eliminar la materia orgánica (DQO), a los que se aplicaron tres niveles de carga orgánica en el afluente para cada biorreactor,

Reactores Evaluados: 1) un Disco Biológico Rotatorio (RBC= Biodisco) (12, 20 y 25 g DQO/m²-día); (2) un filtro percolador (FP) (2,67, 5,33 y 8 kg DQO/m³-día); (3) un reactor anaeróbico de manto de lodos de flujo ascendente (UASB) (13,31, 15,98 y 18,65 kg DQO/m³-día); (4) un filtro anaeróbico de flujo ascendente en dos etapas separadas (DI-FAFS) (3.71, 2.76 y 1,8 kg DQO/m³-día); y (5) un filtro anaeróbico de flujo ascendente en tres etapas separadas (TRI-FAFS) (2,25, 3,45 y 4,44 kg DQO/m³-día).

Esta investigación busca desarrollar modelos para la cinética del crecimiento de células microbianas, utilización de sustratos orgánicos y producción de metano en filtros anaeróbicos de flujo ascendente en dos y tres etapas separadas para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios.

2. Metodología

El desarrollo de esta investigación se llevó a cabo en cinco (5) Fases que fueron:

2.1. Caracterización inicial

Se caracterizaron los lixiviados de rellenos sanitarios (RS) provenientes de Guayabal y La Cortada (Norte de Santander, Colombia), analizando parámetros como Demanda Química de Oxígeno (DQO) y composición química.

2.2. Montaje experimental

Se diseñaron y operaron reactores de flujo ascendente (DI-FAFS y TRI-FAFS) para evaluar la remoción de materia orgánica en distintas etapas. Los esquemas incluyeron detalles de volúmenes, temperaturas (20°, 27° y 37°C) y tiempos de operación.

2.3. Formulación de modelos híbridos

Se desarrollaron modelos cinéticos para describir el crecimiento microbiano, la utilización de sustratos y la producción de metano.

2.4. Calibración

Los modelos fueron calibrados utilizando datos experimentales, incluyendo tasas de crecimiento bacteriano (r_g), uso de sustratos (r_s) y producción de metano (r_{CH_4})

2.5. Validación

Validación de Modelos: Los modelos cinéticos fueron validados utilizando datos experimentales, incluyendo tasas de crecimiento bacteriano, uso de sustratos y producción de metano. Se utilizaron herramientas como MATLAB para comparar los resultados observados y estimados, asegurando la robustez de las conclusiones mediante análisis estadísticos ANOVA.

o

Configuración del Reactor: La configuración en etapas del TRI-FAFS permitió mejorar la solubilidad de compuestos recalcitrantes, maximizando la biodegradación y reduciendo la inhibición metabólica. La caracterización microbiana mostró una progresión funcional: bacterias hidrolíticas y acidogénicas en la primera etapa, acidogénicas y acetogénicas en la segunda, y metanogénicas en la tercera

3. Análisis Estadístico

Para describir el comportamiento de las bacterias en términos de producción de metano, se ajustaron modelos no lineales utilizando el algoritmo de Levenberg-Marquardt. Este método permitió estimar los parámetros cinéticos clave y evaluar la calidad del ajuste mediante el coeficiente de determinación (R^2) y el error estándar de las estimaciones. Los resultados estadísticos fueron analizados mediante ANOVA para determinar la significancia de las diferencias entre tratamientos y modelos, asegurando la robustez de las conclusiones.

4. Resultados y Analisis

Los resultados presentados en el documento reflejan un análisis detallado de la cinética de crecimiento microbiano, utilización de sustratos y producción de metano en los filtros anaeróbicos fig.1 DI-FAFS y fig.2 TRI-FAFS. A continuación, los análisis más relevantes basados en los gráficos y modelos desarrollados:

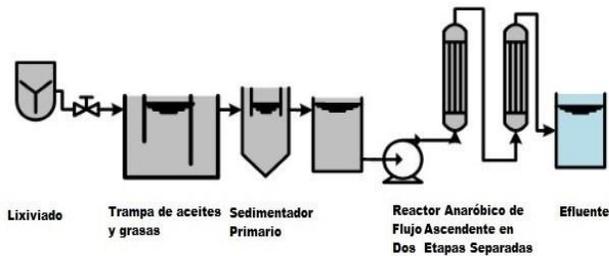


Figura 1. Sistema de Tratamiento de Filtro Anaerobio en 2 Fases Separadas (DI-FAFS).

Fuente: Autor

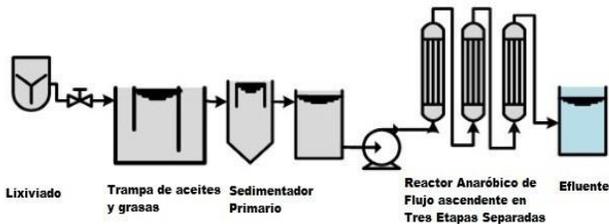


Figura 2. Sistema de Tratamiento de Filtro Anaerobio en 3 Fases Separadas (TRI-FAFS)

Fuente: Autor

4.1. Impacto de la Temperatura en la Eficiencia de los Reactores

Los reactores DI-FAFS y TRI-FAFS mostraron mayor eficiencia en la remoción de DQO a medida que la temperatura aumentaba de 20°C a 34°C¹. Esto sugiere que la actividad microbiana se ve favorecida por temperaturas más elevadas dentro de este rango¹.

El reactor TRI-FAFS alcanzó una reducción de DQO 1.5 veces mayor que el DI-FAFS, lo que indica que la separación en tres etapas mejora significativamente la capacidad de tratamiento¹. Esta configuración permite una mayor

especialización de las comunidades microbianas en cada etapa, optimizando la degradación de compuestos recalcitrantes

4.2 Producción de Metano

La tasa de producción de metano (r_{CH_4}) fue estable en ambos reactores, independientemente del número de etapas o la temperatura¹. Esto sugiere que las condiciones operativas mantenían un equilibrio robusto para la metanogénesis.

Las gráficas de producción de metano contra tiempo revelaron incrementos sostenidos en las primeras horas de operación, alcanzando valores máximos a temperaturas mayores (34°C). Esto refuerza la idea de que la temperatura influye positivamente en la actividad metalogénica.

4.3 Comportamiento Microbiano

Las tasas de crecimiento microbiano (r_g) y la utilización de sustratos (r_s) mostraron una correlación positiva con la temperatura y el diseño del reactor⁴. Esto indica que tanto la temperatura como la configuración del reactor afectan la actividad y el crecimiento de los microorganismos²...

Methanobacterium sp. y *Methanococcus sp.* mostraron un crecimiento óptimo entre 27°C y 34°C⁴. Los diagramas de caja y bigotes destacaron una variabilidad reducida en estos rangos de temperatura, lo que sugiere condiciones estables y favorables para estas especies⁵.

Clostridium sp. desempeñó un papel significativo en la reducción de sulfatos, complementando la eficiencia general del sistema

4.4. Modelos Híbridos y Acoplados

Los modelos desarrollados ajustaron correctamente las tasas observadas de crecimiento microbiano, uso de sustratos y producción de metano, con coeficientes $R^2 > 0.955$. Esto

demuestra la alta precisión de los modelos para predecir el comportamiento de los reactores.

Los diagramas de relación entre r_g , r_s y r_{CH_4} indicaron que el TRI-FAFS favoreció una mayor integración entre etapas, maximizando la conversión de materia orgánica en el metano.

Modelo Híbrido No. 2.

$$\frac{S_e}{S_i} = \exp\left[-k(A)^{T-20}\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^x (COV)^{-n}\right]$$

Modelo Acoplado No. 2

$$\frac{S_e}{S_i} = \exp\left[-k(A)^{T-20}\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^x (COV)^{-n}\right] + \frac{1}{\sqrt{4\pi D_{MV}t}} \exp\left(\frac{-z^2}{4D_{MV}t}\right)$$

DI-FAFS

Modelo Híbrido No. 2.

$$\frac{S_e}{S_i} = \exp\left[-k(A)^{T-20}\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^x \left(\frac{D_2}{D_3}\right)^y (COV)^{-n}\right]$$

TRI-FAFS

Modelo Acoplado No. 2

$$\frac{S_e}{S_i} = \exp\left[-k(A)^{T-20}\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^x \left(\frac{D_2}{D_3}\right)^y (COV)^{-n}\right] + \frac{1}{\sqrt{4\pi D_{MV}t}} \exp\left(\frac{-z^2}{4D_{MV}t}\right)$$

4.5. Esquemas Operativos y Volúmenes Óptimos

Como se puede evidenciar en el gráfico 1 de operación del TRI-FAFS mostraron que el aumento en la separación de fases mejora la asociación de microorganismos específicos con cada etapa, optimizando la conversión.

La distribución de volúmenes entre etapas en TRI-FAFS fue clave para mantener altas tasas de reacción y minimizar acumulación de intermediarios, como ácidos grasos volátiles.

En resumen, la Fig.(3) del reactor TRI-FAFS es crucial para entender cómo la configuración física del sistema facilita la especialización microbiana, optimiza las tasas de reacción y minimiza la acumulación de intermediarios, resultando en una mayor eficiencia en la remoción de DQO de lixiviados El análisis detallado, en conjunto con los datos experimentales, permite comprender mejor el funcionamiento del reactor y optimizar su diseño y operación

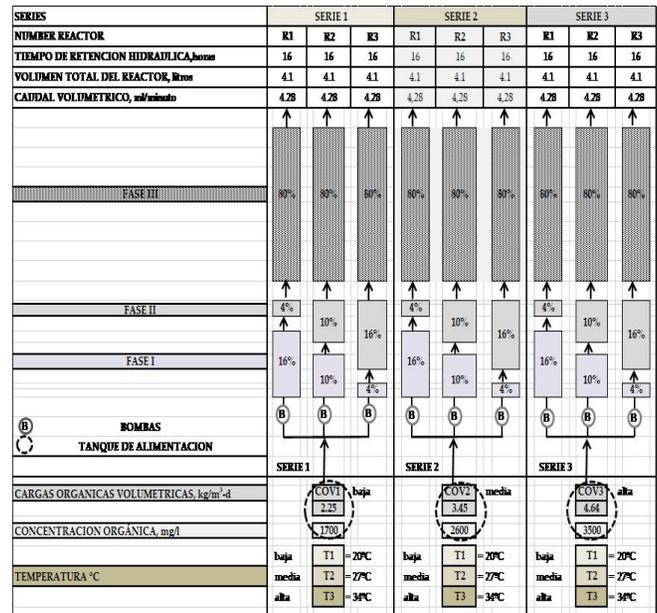


Figura 3. Esquema de los reactores TRI-FAFS con alturas y volúmenes de las tres series. **Fuente:** (Maldonado et al., 2022)

5. Conclusiones

Los sistemas DI-FAFS y TRI-FAFS son opciones viables para tratar lixiviados complejos. El TRI-FAFS demostró ser particularmente eficaz en la eliminación de DQO, alcanzando eficiencias del 85% al 95%, seguido por el DI-FAFS con eficiencias del 70% al 85%3.... Esto subraya la importancia de los reactores anaeróbicos de múltiples etapas en el tratamiento de lixiviados.

La configuración en etapas del TRI-FAFS permitió mejorar la solubilidad de compuestos recalcitrantes, maximizando la biodegradación y reduciendo la inhibición metabólica3.... Esto sugiere que la división en etapas facilita la descomposición de compuestos complejos al proporcionar ambientes especializados para diferentes tipos de microorganismos. La caracterización microbiana en el TRI-FAFS mostró una progresión funcional: bacterias hidrolíticas y acidogénicas en la primera etapa, acidogénicas y acetogénicas en la segunda, y metanogénicas en la tercera. Esta especialización microbiana es crucial para la eficiencia del proceso

de tratamiento. La temperatura influyó significativamente en la producción de biomasa y metano. Tasas estables de 100 a 102 UFC/mL/h y 10^{-2} mg/d por mg/L/h fueron observadas, lo que indica que el control de la temperatura es un factor importante en la optimización de estos reactores. Los modelos cinéticos son importantes en el diseño y optimización de reactores anaeróbicos de múltiples etapas. Estos modelos permiten prever el rendimiento del proceso bajo diferentes condiciones operativas. Los modelos desarrollados ajustaron correctamente las tasas observadas de crecimiento microbiano, uso de sustratos y producción de metano, con coeficientes $R^2 > 0.95$. Los sistemas DI-FAFS y TRI-FAFS proporcionan un enfoque sostenible y mejorado para la remoción de materia orgánica mediante reactores anaeróbicos de múltiples etapas2.... Esto resalta la importancia de estos sistemas como una alternativa eficaz y sostenible para el tratamiento de lixiviados complejos. *Methanobacterium sp.* y *Methanococcus sp.* mostraron un crecimiento óptimo entre 27°C y 34°C8. *Clostridium sp.* desempeñó un papel significativo en la reducción de sulfatos, complementando la eficiencia general del sistema.

Referencias

- [1] R. C. Contrera, M. J. Lucero Culi, D. M. Morita, J. A. D. Rodrigues, M. Zaiat, y V. Schalch, «Biomass growth and its mobility in an AnSBBR treating landfill leachate», *Waste Manag.*, vol. 82, pp. 37-50, 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2018.10.006.
- [2] T. Saeed, M. J. Miah, N. Majed, M. K. Alam, y T. Khan, «Effect of effluent recirculation on nutrients and organics removal performance of hybrid constructed wetlands: Landfill leachate treatment», *J. Clean. Prod.*, vol. 282, p. 125427, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125427.
- [3] I. Righetto, R. A. Al-Juboori, J. U. Kaljunen, y A. Mikola, «Multipurpose treatment of landfill leachate using natural coagulants - Pretreatment for nutrient recovery and removal of heavy metals and micropollutants», *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 9, n.º 3, 2021, doi: 10.1016/j.jece.2021.105213.
- [4] U. Anand *et al.*, «SARS-CoV-2 and other pathogens in municipal wastewater, landfill leachate, and solid waste: A review about virus surveillance, infectivity, and inactivation», *Environ. Res.*, vol. 203, n.º July 2021, p. 111839, 2022, doi: 10.1016/j.envres.2021.111839.
- [5] V. Saxena, S. Kumar Padhi, P. Kumar Dikshit, y L. Pattanaik, «Recent developments in landfill leachate treatment: Aerobic granular reactor and its future prospects», *Environ. Nanotechnology, Monit. Manag.*, vol. 18, n.º March, p. 100689, 2022, doi: 10.1016/j.enmm.2022.100689.
- [6] Julio Maldonado-Maldonado, Adriana Márquez-Romance, Edilberto Guevara-Pérez, Sergio Pérez-Pacheco, «Cinética de crecimiento de células microbianas, utilización de sustratos orgánicos y producción de metano en filtros anaerobios de flujo ascendente en dos y tres etapas separadas para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios , .», *Gestión la Calid. Ambient. , 10.1002/tqem.*, vol. 34, 1, 2024.
- [7] U. C. Molasses y K. Models, «Cinética de crecimiento de gluconacetobacter diazotrophicus usando melaza de caña y sacarosa : evaluación de modelos c i n é t i cos Kinetics of Gluconacetobacter diazotrophicus Growth Using Cane Molasses and Sucrose: Assessment of Kinetic Mo», *Acta Biológica Colomb. vol. 24, núm. 1, pp. 38-57, 2019*, vol. 24, pp. 1-20, 2019.
- [8] J. I. Maldonado Maldonado, A. M. Márquez Romance, E. Guevara Pérez, S. A. Pérez Pacheco, y D. J. Rey Lago, «Novel hybrid models for the design of upflow anaerobic filters separated in phases», *Environ. Qual. Manag.*, vol. 31, n.º 3, pp. 155-166, 2022, doi: 10.1002/tqem.21769.