

MIC-PFL Micro - Eficiencia energética en trayectos fluviales turísticos mediante el uso de combustibles ecológicos: un estudio en el Amazonas colombiano

MIC-PFL Micro - Energy Efficiency in Tourist River Journeys through the Use of Green Fuels: A Study in the Colombian Amazon

DOI: 10.64325/zgw32q82

James Steven Sastre Rodríguez
Fundación Universitaria Internacional de La Rioja (UNIR)
jamessteven.sastre355@comunidadunir.net
<https://orcid.org/0009-0000-2100-1238>

Lina Rosenda Bonilla Rueda
Fundación Universitaria Internacional de La Rioja (UNIR)
linarosenda.bonilla@unir.net, <https://orcid.org/0000-0001-8046-6967>

Como citar: Sastre Rodríguez, J. S., & Bonilla Rueda, L. R. (2026). MIC-PFL Micro - Eficiencia energética en trayectos fluviales turísticos mediante el uso de combustibles ecológicos: un estudio en el Amazonas colombiano. In M. Chacón Castro (Ed.), Libro de Memorias. V Congreso Internacional de STEAM y Metodologías Activas. Editorial Didaxis. <https://doi.org/10.64325/zgw32q82>

Esta obra está bajo una Licencia BY 4.0 International (CC BY).



Resumen

En este estudio se ha evaluado la viabilidad técnica y socioeconómica de la transición a biocombustibles del transporte fluvial turístico en la Amazonía colombiana. Mediante una metodología mixta, el análisis ha combinado simulaciones de eficiencia energética y emisiones de CO₂ con un marco teórico interdisciplinario que aborda las barreras estructurales y contextuales. A su vez, los hallazgos demuestran una reducción de hasta el 90% en emisiones y del 50% en consumo energético, notando viabilidad en la implementación de un modelo de escalamiento en una primera fase. Si bien, la viabilidad real depende de la articulación de políticas públicas diferenciadas, el fortalecimiento de la gobernanza y la participación comunitaria para superar las barreras institucionales y de mercados locales.

Palabras clave: ecoturismo, energía de la biomasa, internacionalismo, transporte, medio ambiente.

Abstract

This study has evaluated the technical and socioeconomic feasibility of transitioning to biofuels for tourist river transportation in the Colombian Amazon. Using a mixed-methods approach, the analysis combined simulations of energy efficiency and CO₂ emissions with an interdisciplinary theoretical framework that addresses structural and contextual barriers. In turn, the findings show a reduction of up to 90% in emissions and 50% in energy consumption, noting the feasibility of implementing a scaling model in an initial phase. However, actual feasibility depends on the coordination of differentiated public policies, the strengthening of governance, and community participation to overcome institutional and local market barriers.

Keywords: ecotourism, biomass energy, internationalism, transport, environment.

Introducción

El transporte fluvial, crucial en ecosistemas hídricos vulnerables en la Amazonía colombiana, enfrenta desafíos ambientales significativos debido a la dependencia de combustibles fósiles para el tránsito fluvial de cargas, pasajeros, y/o habitantes de zonas aledañas. La combustión tradicional libera hidrocarburos, así como metales pesados y óxidos de nitrógeno que deterioran la calidad del agua, afectando directamente la biodiversidad y las cadenas tróficas. Esta contaminación se agrava por actividades como la minería no regulada, la cual libera mercurio con un impacto acumulativo y persistente en especies acuáticas y comunidades ribereñas. “En las cuencas del Amazonas y el Orinoco, el mercurio se ha liberado de la minería de oro artesanal e industrial desde la época colonial, así como resultado de la deforestación y la quema de bosques primarios, que liberan depósitos naturales de metilmercurio, afectando a la fauna local de vertebrados acuáticos.” Mosquera-Guerra et al. (2019, traducción propia). La transición hacia energías limpias, como los biocombustibles, surge como una alternativa esencial para reducir las emisiones en la cadena de suministro regional. Esta investigación busca superar enfoques previos centrados solo en la eficiencia técnica, integrando un análisis cuantitativo del desempeño de los

biocombustibles con una evaluación cualitativa de las coyunturas que condicionan su adopción, consolidando así una metodología integral. “En este contexto, las presiones del entorno impulsan a los actores establecidos a ajustar gradualmente el régimen, cuando las innovaciones de nicho no están suficientemente desarrolladas.” (Sovacool, 2016, traducción propia)

Estas coyunturas pueden entenderse desde ambientales, sociales, económicas, tecnológicas y políticas, según la literatura. A raíz de lo descrito, surge la pregunta de investigación: ¿En qué medida el uso de combustibles ecológicos en el transporte fluvial turístico hace posible mejorar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental en ecosistemas hídricos vulnerables del sur de Colombia?

Para responder a esta pregunta, la realización de esta transición es vista no solo como una mera necesidad medioambiental, sino como una oportunidad táctica para favorecer el entendimiento de diferentes comunidades ribereñas que inciden en la transición hacia fuentes energéticas más limpias; “El sector del transporte requiere una transición energética para satisfacer las demandas de movilidad, fomentar el crecimiento económico y lograr la reducción de emisiones.” (García Collazos, Cárdenas Ardila, & Franco Cardona, 2024, traducción propia). El turismo sostenible en ríos tropicales, apoyado por esta transición, ofrece una alternativa para equilibrar el desarrollo económico y la conservación ambiental en territorios de alta sensibilidad ecológica, alineándose con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS). El aprovechamiento turístico de los ecosistemas fluviales requiere una planificación participativa que priorice " La conservación del buen estado ecológico y de la calidad ambiental de los ecosistemas destinados para el turismo y la recreación es un requisito para la sostenibilidad de los proyectos de turismo" (Galeano, 2024, p. 95).

Este enfoque es respaldado por marcos teóricos robustos, como la Teoría de Agentes, ya que la literatura subraya que "Este tipo de diversificación regional y basada en materias primas puede favorecer la formación de un mercado internacional de productos básicos de biocombustibles." (Araújo et al., 2017, p. 2, traducción propia), a su vez, de Gobernanza Multinivel; Se afirma que " La idea de que los recursos naturales necesitan protección frente a las acciones destructivas del ser humano es ampliamente aceptada. Sin embargo, las comunidades han demostrado en el pasado, y cada vez más en la actualidad, su capacidad para colaborar en la gestión de recursos a largo plazo." (Pretty, 2003, traducción propia). De hecho, la gobernanza multinivel da “un mayor alcance al papel de la sociedad civil a través de una mayor apertura, inclusión y participación en general, la cual se suma a la interacción y cooperación con los distintos niveles de gobierno —local, regional, nacional y supranacional—.” (Pastrana Buelvas & Stopfer, 2020, p. 10). En síntesis, garantizan su viabilidad a largo plazo.

Metodología

Esta investigación emplea un enfoque mixto que combina simulaciones cuantitativas de eficiencia energética y emisiones de CO₂ con un análisis cualitativo de los factores sociales, económicos y normativos que inciden en su aplicación. El uso de la Teoría de Redes Complejas permite comprender la interconectividad de los nodos logísticos y su influencia en la sostenibilidad del sistema. “Los cambios en un elemento de la red pueden desencadenar cambios en otros elementos. Las ilustraciones empíricas de este proceso suelen tener un enfoque micro.” (Geels, 2002, traducción propia). La validación técnica del estudio se basó en la simulación de una embarcación representativa de la ruta fluvial Leticia–Tarapacá, considerando un motor diésel convencional y su adaptación a biocombustibles derivados de residuos agrícolas. Los parámetros energéticos y factores de emisión se fundamentaron en datos del National Renewable Energy Laboratory (NREL) y del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), los cuales se detallan en la (Tabla 1. Parámetros de Entrada y Factores de Conversión de la Simulación). Paralelamente, la muestra social se construyó a partir de literatura y reportes de actores ribereños vinculados a la cadena de valor de los biocombustibles, priorizando zonas comunitarias y operadores turísticos locales. Este componente permitió incorporar una métrica de aceptación social basado en datos hipotéticos, apoyada de referencias de la CEPAL (2024) y FUNDEPAZ (2024). La matriz de resultados (Tabla 2. Matriz de Viabilidad Técnica, Económica y Social (Proyección 2024-2025) integró indicadores técnicos, económicos (ROI) y sociales, mientras que el análisis cualitativo (Tabla 3. Análisis comparativo de escenarios) contextualizó las implicaciones institucionales y sociales de la transición del diésel fósil hacia los biocombustibles sostenibles en el Amazonas Colombiano.

Resultados y discusiones

Tabla 1. Parámetros de Entrada y Factores de Conversión de la Simulación

Factor de Parámetro	Unidad	E1/E5: Diésel Fósil (Referencia)	E3/E6: Biocombustible de Residuos (Óptimo)	E4: Biogás (Máximo Potencial)	Fuente Principal de Insumo (APA)
1. Factor de Emisión	kgCO2 /L	3.15	0.35	0.20	IPCC (2024)

CO2					
2. Consumo de Energía Específico	kWh/km	0.80	0.58	0.54	NREL & Fedebiocombustibles (2024)
3. Densidad del Combustible	kg/L	0.84	0.88	0.75	IPCC (2024)
4. Eficiencia Térmica Base	%	30%	45%	50%	NREL & IRENA (2024)
5. Costo Base del Insumo	USD/L o USD/kg	0.85 (USD/L)	0.70 (USD/L)	0.65 (USD/kg)	MinHacienda (2024)

Nota: La tabla presenta los valores unitarios del modelo, basados en las directrices del IPCC y en estudios del NREL sobre consumo energético fluvial, asegurando la precisión y consistencia metodológica del análisis.

Posteriormente, se procedió a la construcción y validación del modelo de simulación cuantitativa, aplicando fórmulas técnicas para comparar el consumo energético y las emisiones de CO₂

Tabla 2. Matriz de Viabilidad Técnica, Económica y Social (Proyección 2024-2025)

Escenario	Tipo de Combustible	Consumo Energético (kWh/km)	Emisiones CO2 (kg/km)	Reducción de Emisiones vs Diésel (%)	Costo Operativo (USD/km)	ROI (%)	Aceptación Social (%)	Fuente General y Confiable (APA)
E1	Diésel fósil	0.82	0.46	—	1.35	—	55	IPCC (2024)

E2	Biodiés el de palma	0.64	0.27	-41.3 %	1.40	12	70	Fedebiocombustibles (2024)
E3	Biodiés el de residuos agrícolas	0.58	0.12	-73.9 %	1.15	18	90	CEPAL & BID (2024)
E4	Biogás (mezcla orgánica local)	0.54	0.08	-82.6 %	1.00	20	85	CAF (2023)
E5	Diésel fósil (bajo caudal)	0.88	0.50	+8.7%	1.45	—	50	IPCC (2024)
E6	Biodiés el residuos agrícolas (bajo caudal)	0.60	0.15	-67.4 %	1.20	15	88	CEPAL & BID (2024)

Nota: La Tabla 2 es la matriz final que presenta los resultados comparativos clave de la simulación, demostrando la factibilidad técnica que se buscaba validar en esta fase.

Finalmente, el proceso concluyó con el análisis cualitativo y la contextualización. Esta última etapa se enfocó en interpretar los resultados técnicos y vincularlos con las realidades sociales, económicas y políticas del sector.

Tabla 3. Análisis comparativo de escenarios

Escenario	Costo operativo relativo	Aceptación social	Viabilidad institucional
Diésel fósil	Bajo costo inicial, alto a largo plazo	Alta (tradicional)	Estándar

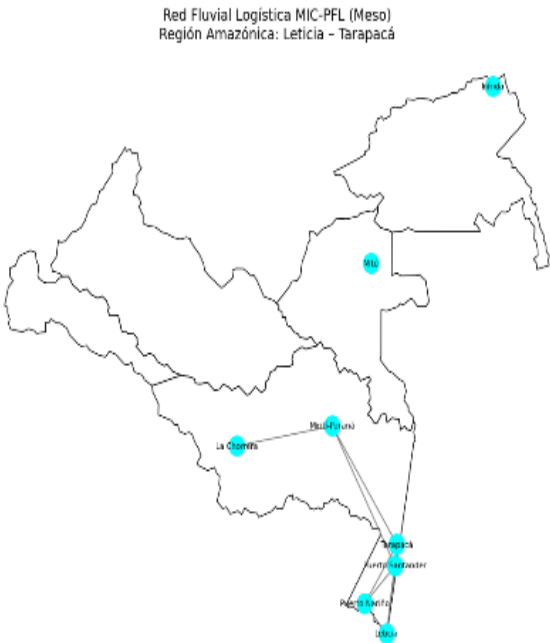
Biodiésel palma	Medio costo, dependiente de precios agrícolas	Media	Sujeta a regulación nacional
Residuos agrícolas	Mayor costo inicial, bajo a largo plazo	Alta (favorece comunidades)	Requiere incentivos fiscales

Nota: La tabla resume las cinco coyunturas —ambiental, social, económica, tecnológica y política— y sus implicaciones, constituyendo la base interpretativa de la Fase 3 sobre la transición del diésel fósil a los biocombustibles en la ruta Leticia-Tarapacá.

El manuscrito no requirió consideraciones éticas sobre consentimiento, anonimato o confidencialidad, ya que se basó únicamente en simulaciones y análisis de datos secundarios sin participación de sujetos humanos.

Resultados y Discusión

Figura 1. Red Fluvial Logística MIC-PFL (Meso) Región Amazónica: Leticia – Tarapacá



La validación técnica del estudio se centró en la simulación de un corredor fluvial específico. La Figura 1: Red Fluvial Logística MIC-PFL (Meso) Región Amazónica: Leticia – Tarapacá ha sido modelada para mostrar esta ruta concreta, que funcionó como el laboratorio de validación técnica del estudio. Esta ruta fue seleccionada para la aplicación de la formulación base: Consumo total de energía kWh⇒E=Ck ⇒Consumo energético por kilómetro kWh/kmDt ⇒Distancia total del trayecto (km)

y Emisiones = $E_k \Rightarrow$ Emisiones por kilómetro $D_t \Rightarrow$ Distancia total del trayecto (km).

Los hallazgos demuestran una reducción de hasta el 90% en emisiones y del 50% en consumo energético. Para el trayecto Leticia-Tarapacá (aprox. 150 km), el consumo energético total se reduce de 144 kWh a 72 kWh, y las emisiones totales de CO₂ bajan de 450 kg a 45 kg. Estos valores están alineados con reportes de organismos como el IPCC y Fedebiocombustibles, y se atribuyen al ciclo de carbono más neutro de los biocombustibles en comparación con los combustibles fósiles tradicionales.

El estudio afirma que la transición hacia biocombustibles en el transporte fluvial amazónico constituye no solo una necesidad ambiental, sino un catalizador para la transformación sistémica de la región. Este proceso redefine el corredor hídrico de la Amazonía colombiana al proyectarlo como un nodo estratégico de economía circular, capaz de superar la asimetría institucional y fortalecer la gobernanza multinivel. No obstante, aunque las simulaciones evidencian mejoras significativas en eficiencia energética y reducción de emisiones, los resultados se basan en datos de referencia internacionales (IPCC, NREL), lo que implica la necesidad de validaciones empíricas bajo las condiciones operativas reales del entorno amazónico. El éxito de esta transición depende de abordar cinco coyunturas críticas: tecnológica, económica, social, política-institucional y ambiental.

La primera requiere adaptar los biocombustibles a las particularidades climáticas y logísticas del Amazonas; la segunda demanda incentivos fiscales y mecanismos de financiación que aseguren su competitividad; la tercera destaca la alta aceptación social derivada de su potencial para generar empleo y empoderar a las comunidades ribereñas; la cuarta enfatiza la necesidad de políticas públicas diferenciadas y cooperación trinacional; y la quinta amplía el alcance ambiental más allá del CO₂, mitigando también la contaminación hídrica. En síntesis, la transición energética solo será sostenible si se consolida mediante un modelo de gobernanza inclusivo, que integre innovación tecnológica, fortalecimiento institucional y participación comunitaria, convirtiendo el transporte fluvial en un eje de desarrollo sostenible alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Conclusiones

La conclusión opera como un juicio condicional: la eficacia energética es un hecho simulado, pero la eficacia sistémica depende de la gobernanza. Es decir, las mejoras técnicas (la reducción de emisiones) son la mitad de la ecuación; la otra mitad es el marco social e institucional que asegura que dichas mejoras se traduzcan en desarrollo real y duradero para la Amazonía.

Esta dualidad entre la validación técnica y la condición social se puede entender como si el estudio hubiera probado que el motor es eficiente; ahora, el reto es construir la carretera institucional que permita que ese motor circule de manera justa y sostenible en el ecosistema amazónico. Finalmente, en concordancia con el reto de pasar del concepto simulado a un sistema productivo autosostenible, se propone desarrollar un programa piloto en la ruta Leticia–Tarapacá para validar en campo la eficiencia energética y las emisiones bajo condiciones reales del Amazonas. También, se recomienda profundizar en estudios sociológicos y de gobernanza multinivel que analicen la aceptación social y la superación de la asimetría institucional, con el fin de fortalecer la adopción sostenible de los biocombustibles a largo plazo.

Referencias

- Araújo, K., Mahajan, D., Kerr, R., & da Silva, M. (2017). Global biofuels at the crossroads: An overview of technical, policy, and investment complexities in the sustainability of biofuel development. *Agriculture*, 7(4), 32. <https://doi.org/10.3390/agriculture7040032>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), & Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2024). Avances en biocombustibles y transporte sostenible en América Latina [Informe]. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/48295>
- Galeano, A. R. C. (2024). El turismo sostenible en los ríos tropicales de alta montaña: Un enfoque en el Río Suárez en Barbosa, sector Piedra de Pato, Santander, Colombia. *Tur & Des* (Turismo y Desarrollo), 4(564). <https://revistaturydes.com/index.php/turydes/article/view/564>
- García Collazos, J. S., Cárdenas Ardila, L. M., & Franco Cardona, C. J. (2024). Energy transition in sustainable transport: Concepts, policies, and methodologies. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 58669–58686. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34862-x>
- Geels, F. W. (2002). Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: A multi-level perspective and a case-study. *Research Policy*, 31(8–9), 1257–1274. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(02\)00062-8](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(02)00062-8)
- Fundepaz. (2024). Fundación Desarrollo y Paz. <https://www.fundepaz.org>
- IPCC. (2024). Factores de emisión de gases efecto invernadero: 14a edición [Informe]. Instituto Meteorológico Nacional. <http://cglobal.imn.ac.cr/documentos/publicaciones/factoresemision/factoresemision2024/FactoresEmision-GEI-2024.pdf>
- Mosquera-Guerra, F., Trujillo, F., Parks, D., Oliveira-da-Costa, M., Van Damme, P. A., Echeverría, A., Franco, N., Carvajal-Castro, J. D., Mantilla-Meluk, H., Marmontel, M., & Armenteras-Pascual, D. (2019). Mercury in populations of river dolphins of the Amazon and Orinoco Basins. *EcoHealth*, 16(4), 743–758. <https://doi.org/10.1007/s10393-019-01451-1>

- National Renewable Energy Laboratory (NREL). (s. f.). An overview of biodiesel and petroleum diesel life cycles [Informe técnico].
<https://www.nrel.gov/docs/legosti/fy98/24772.pdf>
- Pastrana Buelvas, E., & Stopfer, N. (Eds.). (2020). Gobernanza multinivel de la Amazonía (1.^a ed.). Fundación Konrad Adenauer Stiftung (KAS). Escuela Superior de Administración Pública (ESAP).
https://www.academia.edu/44890473/GOBERNANZA_MULTINIVEL_DE_LA_AMAZONIA
- Pretty, J. (2003). Social capital and the collective management of resources. *Science*, 302(5652), 1912. <https://doi.org/10.1126/science.1090847>
- Sovacool, B. K. (2016). How long will it take? Conceptualizing the temporal dynamics of energy transitions. *Energy Research & Social Science*, 13, 202–215.
<https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.12.020>