

Biomasa amazónica: Transformando Residuos en Energía Limpia

Daynner David Gonzalez Villarreal
ddgonzalezv@unadvirtual.edu.co
Estudiante de Ingeniería Industrial
Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD)
<https://orcid.org/0009-0004-3859-4490>

Camila Andrea Segura Ocampo
camila.segura@unad.edu.co
Magister en Ingeniería Física
Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD)
<https://orcid.org/0009-0002-6147-9265>

Resumen

El presente artículo revisión de la literatura busca poner al descubierto el potencial que tiene la biomasa amazónica como fuente de energía limpia en un contexto caracterizado por depender de combustibles fósiles y la escasa infraestructura de energías renovables en la Amazonía. Para ello, se realizó una búsqueda sistemática en bases de datos académicas que empleaba una ecuación de búsqueda adecuada que permitió identificar más de 50 bibliografías. La metodología aplicada para realizar la revisión de la literatura incluyó la extracción, lectura y análisis crítico de artículos científicos, libros, y documentos técnicos, realizando la confrontación de diversas posturas teóricas para conseguir los argumentos más sólidos sobre la evolución de los marcos teóricos en torno a la biomasa y su aprovechamiento energético. Los resultados más importantes mostraron la existencia de un cuadro de patrones y tendencias en el uso de la biomasa amazónica, y, en consecuencia, por el lado de las oportunidades para la generación de energía sostenible, pero también de los problemas que existen al respecto, una vez que la biomasa puede ser el traspaso hacia la deforestación, etc., y la ausencia de políticas públicas. Del mismo modo, se identificaron conceptos que se engarzan en la línea de la gestión de procesos y la optimización de los recursos como claves para el desarrollo de proyectos de ingeniería industrial. La magnitud e importancia de los resultados aparece por el hecho de ser un hilo para orientarse hacia un modelo de energía más limpio y sostenible.

Palabras claves: Biomasa amazónica, energía limpia, energía renovable, sostenibilidad, análisis comparativo, ingeniería industrial.

Abstract.

This literature review article aims to uncover the potential of Amazonian biomass as a source of clean energy within a context marked by a dependence on fossil fuels and limited renewable energy infrastructure in the Amazon region. To achieve this, a systematic search was conducted in academic databases using a well-structured search equation, which allowed the identification of more than 50 bibliographic

sources. The methodology applied in this literature review involved the extraction, reading, and critical analysis of scientific articles, books, and technical documents. Different theoretical perspectives were contrasted to establish the most solid arguments regarding the evolution of theoretical frameworks around biomass and its energy use. The main findings revealed a set of patterns and trends in the use of Amazonian biomass, highlighting both opportunities for sustainable energy generation and existing challenges, such as the risk of deforestation and the lack of effective public policies. In addition, key concepts related to process management and resource optimization were identified as essential for the development of industrial engineering projects. The significance and relevance of these findings lie in their potential to guide a transition toward a cleaner and more sustainable energy model.

Keywords: Amazonian biomass, clean energy, sustainability, process management, renewable energy, resource optimization, sustainable development.

1. Introducción

La transición hacia fuentes de energía renovable se ha vuelto prioritaria debido a la crisis climática global y al impacto ambiental negativo asociado al uso intensivo de combustibles fósiles (Demirbaş, 2001; André et al., 2012). En este contexto, la biomasa surge como una alternativa viable, especialmente en regiones con abundantes recursos naturales como la Amazonía. Esta región, que se extiende por nueve países sudamericanos, posee una vasta disponibilidad de residuos orgánicos provenientes de la actividad agrícola, forestal y doméstica, lo que la convierte en un territorio estratégico para el desarrollo de bioenergía (Cuervo & Guzmán, 2020).

Sin embargo, la falta de infraestructura adecuada, marcos regulatorios específicos y políticas públicas orientadas a la sostenibilidad energética ha limitado la explotación de este recurso en países como Brasil, Perú y Colombia. En muchas comunidades amazónicas rurales, el acceso a la electricidad es limitado o inexistente, y más del 70 % de la energía consumida en la región sigue dependiendo de combustibles fósiles (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2022; García & Amaya, 2021). Esta situación evidencia una contradicción entre el potencial natural disponible y su bajo nivel de aprovechamiento.

El presente artículo de revisión bibliográfica se enfoca en el análisis del aprovechamiento energético de la biomasa amazónica desde una perspectiva técnico ambiental. Para ello, se abordan primero las generalidades sobre la biomasa como fuente de energía, y luego se examinan los enfoques teóricos y metodológicos aplicados a la región amazónica. Se hace especial énfasis en los procesos de conversión, la gestión sostenible de recursos y su vinculación con la ingeniería industrial.

La estructura del artículo está diseñada para ofrecer una visión integral del problema. Se inicia con una contextualización global y regional sobre el panorama energético de la Amazonía, seguida por un marco teórico centrado en las características y

beneficios ambientales de la biomasa. Posteriormente, se describe la metodología de revisión utilizada, basada en un proceso sistemático de búsqueda y análisis de más de 50 fuentes académicas. Finalmente, en los resultados y la discusión se sintetizan las principales tendencias, oportunidades y desafíos identificados, con el objetivo de contribuir al diseño de estrategias sostenibles y contextualizadas para el uso energético de la biomasa en esta región.

2. Materiales y Métodos

La presente investigación se desarrolló mediante una revisión bibliográfica sistemática centrada en el aprovechamiento energético de la biomasa amazónica. La búsqueda de información se llevó a cabo en bases de datos académicas de alto impacto, como Scopus, Web of Science y Google Scholar, utilizando una ecuación de búsqueda que combinó términos clave con operadores booleanos. Un ejemplo de la ecuación utilizada fue: ("biomasa amazónica" AND "energía renovable") OR ("bioenergía" AND "Amazonía") AND ("sostenibilidad" OR "optimización de recursos"). Esta estrategia permitió identificar estudios relevantes sobre la conversión de biomasa en energía, la sostenibilidad ambiental y la eficiencia de los procesos en contextos amazónicos.

Se establecieron criterios de inclusión que contemplaron:

- Publicaciones académicas revisadas por pares
- Documentos publicados entre 2010 y 2024
- Artículos disponibles en español, inglés o portugués
- Estudios centrados en la región amazónica, o en contextos tropicales comparables

Como criterios de exclusión se consideraron:

- Fuentes sin respaldo académico
- Estudios anteriores a 2010
- Publicaciones con enfoque exclusivamente técnico sin vinculación al contexto social o ambiental

La gestión de las referencias bibliográficas y el proceso de análisis se realizaron utilizando el software Mendeley, lo cual facilitó la organización de los artículos, la detección de duplicados y la categorización temática.

El análisis de la información se enfocó en una lectura crítica y comparativa de los textos seleccionados. Se extrajeron datos relevantes sobre conceptos teóricos, metodologías empleadas, resultados, limitaciones y marcos regulatorios. El criterio de selección se basó en su rigurosidad académica y relevancia temporal, con el objetivo de identificar patrones comunes y tendencias emergentes.

El tratamiento de los datos fue de tipo cualitativo, con el fin de generar una síntesis comprensiva sobre las oportunidades y barreras en el uso de la biomasa amazónica

como fuente de energía limpia. Además, se priorizó la identificación de vínculos entre el aprovechamiento energético, la gestión de procesos industriales y la contribución a la mitigación del cambio climático, aportando así un enfoque integral desde la ingeniería industrial y la sostenibilidad.

3. Desarrollo

La redacción del presente artículo se fundamenta en la revisión y el análisis crítico de más de 50 referencias especializadas, que incluyen artículos científicos, informes técnicos de organismos internacionales y estudios de caso locales. Permitiendo identificar y comparar distintos marcos teóricos, enfoques metodológicos y aplicaciones prácticas de la biomasa en la generación de energía limpia. Asimismo, llevamos a cabo un mapeo temático para detectar las tendencias emergentes y las brechas de conocimiento en torno a tecnologías como la pirolisis, la digestión anaerobia y la licuefacción hidrotermal. La confrontación de hallazgos provenientes de contextos tan diversos como la Amazonía, el sudeste asiático y proyectos piloto en África facilitó una visión integral de las fortalezas y limitaciones de cada enfoque. De este modo, garantizamos que nuestras conclusiones y recomendaciones estén respaldadas por evidencia sólida y representen una contribución rigurosa al campo de la bioenergía.

3.1. Generalidades sobre la Biomasa y su Evolución Conceptual

La biomasa es un recurso renovable que se refiere a toda materia orgánica de origen vegetal o animal susceptible de ser utilizada con fines energéticos, ya sea directamente o a través de procesos de conversión (Demirbaş, 2001). Entre las formas más comunes se encuentran los residuos agrícolas, forestales y agroindustriales, así como los cultivos energéticos. En el caso de la región amazónica, destacan subproductos como el bagazo de caña, residuos de palma aceitera, desechos madereros y restos de la actividad forestal sostenible (Cuervo & Guzmán, 2020).

A lo largo del tiempo, el concepto de biomasa ha evolucionado desde un enfoque rudimentario basado en la combustión directa de leña, hacia un modelo más sofisticado y tecnológicamente avanzado. Actualmente, la biomasa es considerada una fuente de energía clave dentro del paradigma de la sostenibilidad y la economía circular, al integrarse en estrategias para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar el cambio climático (Leal Filho et al., 2019). Uno de los principales atributos de la biomasa es su capacidad para captar dióxido de carbono (CO₂) durante su crecimiento, lo que puede compensar parcialmente las emisiones derivadas de su combustión. Por ejemplo, ciertos cultivos energéticos pueden absorber entre 10 y 20 toneladas de CO₂ por hectárea al año, dependiendo de la especie y las condiciones del entorno (IEA Bioenergy, 2022). Este balance positivo de carbono convierte a la biomasa en una opción más limpia en comparación con otras fuentes energéticas.

Además de su rol energético, la biomasa cumple funciones ecológicas relevantes, como el reciclaje de nutrientes y la mejora de la fertilidad del suelo. Su uso sostenible puede contribuir a la restauración de ecosistemas degradados, a la conservación de la biodiversidad y al desarrollo rural (FAO, 2017). Por ello, en las últimas décadas ha emergido una visión más holística que posiciona a la biomasa no solo como una alternativa energética, sino como un recurso estratégico con beneficios múltiples, incluyendo impactos sociales positivos como la generación de empleo y el acceso a energía en comunidades aisladas. Este desarrollo conceptual ha impulsado el avance de tecnologías de conversión más eficientes y limpias, como la gasificación, la digestión anaerobia y el pirólisis, que permiten extraer energía con un menor impacto ambiental. Dichas innovaciones resultan especialmente relevantes en contextos como el amazónico, donde se combina una alta disponibilidad de biomasa con la necesidad urgente de soluciones energéticas sostenibles y adaptadas al entorno local.

3.2. Corrientes Teóricas y Metodologías en el Aprovechamiento Energético de la Biomasa

El aprovechamiento energético de la biomasa ha dado lugar a diversas corrientes teóricas y metodológicas, las cuales han evolucionado al compás del desarrollo tecnológico y la creciente necesidad de soluciones energéticas sostenibles. Este apartado aborda los principales métodos de conversión de biomasa en energía, con especial énfasis en la conversión termoquímica y bioquímica, así como su aplicabilidad potencial en contextos como el amazónico.

La conversión termoquímica es una de las tecnologías más consolidadas dentro del campo de la bioenergía. Este método transforma la biomasa mediante la aplicación de calor, permitiendo obtener productos como biochar, gas de síntesis y aceites combustibles. Entre las técnicas más representativas se encuentran la pirólisis, la gasificación y la combustión. Begum et al. (2024) destacan su versatilidad para tratar diferentes tipos de biomasa y su alta eficiencia energética, aunque también señalan desventajas como la emisión de contaminantes y la necesidad de tecnologías avanzadas para el control del proceso y la depuración de gases.

En contraste, la conversión bioquímica se basa en procesos biológicos como la fermentación o la digestión anaerobia, que permiten transformar residuos orgánicos en biogás, bioetanol o biodiésel. Esta alternativa resulta especialmente viable para residuos húmedos o de origen agrícola, frecuentes en la Amazonía, como los desechos de frutas, restos de palma aceitera y residuos de cultivos alimentarios. Según Roni et al. (2024), aunque esta metodología presenta una menor huella ambiental, puede estar limitada por su menor eficiencia energética y la necesidad de condiciones específicas para su operación óptima.

En el contexto amazónico, donde existen grandes cantidades de residuos agrícolas y forestales, estas tecnologías podrían combinarse estratégicamente. Por ejemplo, los

residuos leñosos y de procesamiento de madera podrían destinarse a pirolisis o gasificación, mientras que los residuos orgánicos de menor contenido lignocelulósico serían más apropiados para la digestión anaerobia. La aplicación de estas tecnologías en la región depende de factores como la accesibilidad tecnológica, la inversión inicial y la disponibilidad de infraestructura.

Además de estas metodologías tradicionales, se están explorando tecnologías emergentes como la licuefacción hidrotermal. Este proceso termoquímico convierte biomasa húmeda en biocombustibles líquidos bajo condiciones de 250–374 °C y 4–25 MPa, sin necesidad de secado previo: el agua subcrítica o supercrítica actúa como disolvente, reactante y catalizador, facilitando la ruptura de enlaces y la remoción de oxígeno en forma de H₂O y CO₂, lo que da lugar a un biooil con alta densidad energética y baja fracción de oxígeno. Esta característica hace a la licuefacción hidrotermal especialmente adecuada para la Amazonía, donde la biomasa presenta contenidos de humedad superiores al 60 % y el secado sería demasiado costoso o inviable en áreas remotas. Además, el biocombustible resultante puede emplearse directamente en motores pesados (marinos, ferroviarios) o refinarse para combustibles de transporte, contribuyendo a la reducción de la huella de carbono al ser un recurso renovable y prácticamente libre de emisiones netas de CO₂.

Tabla 1. Tipos de conversión de biomasa, ventajas, desventajas y aplicaciones en la Amazonía

Tipo de conversión	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones en la Amazonía	Ejemplo de residuos
Termoquímica	Alta eficiencia; versatilidad de materiales; rápida producción de energía	Requiere equipos complejos; emisiones contaminantes	Gasificación de residuos forestales y leñosos	Madera y astillas forestales
Bioquímica	Baja huella ecológica; adecuado para residuos húmedos; menor contaminación	Menor eficiencia energética; necesita condiciones específicas	Digestión de residuos agrícolas, excretas animales y lodos	Bagazo de caña y estiércol animal
Licuefacción hidrotermal	No requiere secado; ideal para biomasa húmeda; genera biocombustibles líquidos	Alta presión y temperatura; tecnología emergente, aún en desarrollo	Potencial futuro en regiones con alta humedad como la Amazonía	Residuos de frutas y lodos de alta humedad

Nota. Elaboración propia a partir de la revisión bibliográfica.

3.3. Aplicaciones y Casos de Estudio en la Región Amazónica

3.3.1 Aprovechamiento de la Biomasa en la Región Amazónica

En la región amazónica, el uso de la biomasa ha demostrado ser una solución viable para la generación de energía sostenible, pese a los retos que implican las características ecológicas, sociales y de infraestructura de esta zona. Los proyectos más destacados se han implementado en Brasil (Pará y Bahía), Colombia (Caquetá y Putumayo) y Bolivia (Pando), donde el limitado acceso a la red eléctrica ha impulsado la búsqueda de soluciones basadas en recursos locales.

En Brasil, Cuervo y Guzmán (2020) evaluaron el potencial energético técnico de la biomasa residual forestal (BRF) y de los cultivos energéticos (BRCE) en siete estados amazónicos, identificando un potencial conjunto de 4 906,96 MW/año (equivale a una capacidad de generación continua cercana a 4,9 GW, suficiente para abastecer el consumo eléctrico anual de aproximadamente cinco millones de hogares en la región amazónica), con el estado de Bahía aportando 3 077,49 MW/año y Pará 1 217,32 MW/año. Estos datos evidencian la capacidad de la biomasa para cubrir la demanda de energía en regiones rurales no interconectadas. Sin embargo, la implementación de plantas basadas en gasificación enfrenta obstáculos como los altos costos de inversión inicial y la ausencia de mecanismos de financiamiento adecuados (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2022).

En Colombia, Chia et al. (2020) documentaron un proyecto piloto en el departamento de Caquetá, basado en la gasificación de bagazo de caña. Este proyecto benefició a más de 228 000 familias rurales y permitió aumentar la cobertura eléctrica del 45 % al 93 % entre 2003 y 2018. No obstante, la expansión hacia departamentos como Putumayo y Guainía se vio limitada por las condiciones geográficas y logísticas, lo que resaltó la necesidad de adoptar soluciones energéticas adaptadas a contextos de difícil acceso.

En Bolivia, un proyecto en la provincia del Pando utilizó digestores anaerobios para transformar residuos de palma aceitera en biogás, alcanzando una capacidad de generación de 2 MW. Aunque los resultados iniciales fueron positivos, el proyecto no se pudo escalar debido a la falta de personal capacitado y a la ausencia de un marco normativo específico (Cuevas y Nava, 2023).

3.3.2 Desafíos y Peligros del Aprovechamiento de la Biomasa

A pesar del potencial energético de la biomasa, su uso no planificado puede provocar deforestación y pérdida de biodiversidad, alterando los equilibrios ecológicos y degradando los ecosistemas amazónicos, especialmente en reservas naturales y territorios indígenas, si no se cuenta con estrategias de manejo sostenible (Greene y Mendoza, 2020).

Además, algunos intentos de implementación han fracasado debido a la desconexión entre las comunidades locales y los equipos técnicos. Por ejemplo, en Sucumbíos (Ecuador) un proyecto de biodigestores fue abandonado tras la retirada de la ONG responsable, lo que dejó la infraestructura inutilizada y generó desconfianza en la población (Greene y Mendoza, 2020).

En contraste, en territorios indígenas y ribereños de la Amazonía peruana y boliviana, cientos de comunidades han diversificado su economía y generado empleo local gracias a la gestión sostenible de biomasa forestal no maderable (resinas, frutos, fibras), fortaleciendo cadenas de valor locales, mejorando los ingresos familiares y estimulando la conservación de bosques primarios.

3.3.3 Evaluación de Políticas Públicas y Planes de Acción

Las políticas públicas han tenido un rol determinante en el desarrollo o estancamiento de estos proyectos. El “Plan de Acción para la Gestión Sostenible de la Biomasa Residual” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2022) establece protocolos de recolección responsable, incentivos fiscales y lineamientos para la conservación de los ecosistemas. Sin embargo, su aplicación ha sido desigual entre países y regiones, debido a debilidades institucionales y a la falta de coordinación intersectorial.

En Brasil, por ejemplo, algunos proyectos han logrado acceder a beneficios fiscales para tecnologías de conversión termoquímica, mientras que, en Bolivia, la falta de regulación específica ha dejado a las comunidades sin apoyo técnico ni financiero. En Colombia, los avances han sido moderados, destacándose el papel de las universidades regionales como agentes dinamizadores de proyectos sostenibles (Chia et al., 2020).

3.4. Desafíos y Oportunidades en la Gestión y Optimización de Recursos

La gestión eficiente de los procesos y la optimización de los recursos son elementos fundamentales en el aprovechamiento energético de la biomasa, especialmente desde un enfoque de la ingeniería industrial, donde el objetivo es maximizar la eficiencia, reducir costos y minimizar impactos ambientales. Como destacan Roni et al. (2024), la aplicación de tecnologías avanzadas y la mejora continua de los procesos permiten elevar la competitividad de la bioenergía frente a fuentes convencionales, consolidándola como una alternativa viable dentro del portafolio energético.

Uno de los principales desafíos técnicos es la heterogeneidad de la biomasa, cuya composición varía en función del tipo, la procedencia y el grado de humedad. Esta variabilidad representa un obstáculo en la escalabilidad de las tecnologías de conversión, ya que limita la estandarización de los procesos industriales. Para abordar este problema, se han desarrollado sistemas automatizados de clasificación y

pretratamiento, como la torrefacción controlada, que mejora la densidad energética y la estabilidad del material, facilitando su procesamiento posterior.

Además, se han aplicado sistemas de recolección mecanizada y software de gestión logística (como BioChain y OptiBiomass), que permiten optimizar las rutas de transporte, reducir tiempos de traslado y minimizar pérdidas durante la recolección y el almacenamiento. Estas herramientas han demostrado una reducción de costos operativos de hasta un 25 % en proyectos piloto en zonas rurales de Brasil y Perú (Cuevas y Nava, 2023). En cuanto al diseño de plantas, la integración de procesos térmicos y biológicos en sistemas híbridos ha permitido aumentar la eficiencia energética global. Por ejemplo, la combinación de gasificación y digestión anaerobia puede elevar el rendimiento energético en un 20 % adicional, comparado con tecnologías aisladas (Begum et al., 2024). Sin embargo, la infraestructura necesaria para la transformación eficiente de la biomasa sigue siendo costosa y, en muchos casos, inaccesible para comunidades amazónicas con limitados recursos financieros. Esto plantea la necesidad de estrategias escalonadas, que incluyan microplantas modulares, desarrolladas con componentes de bajo costo y fácil mantenimiento, así como programas de capacitación técnica que fortalezcan el capital humano local.

La optimización no solo debe centrarse en la eficiencia tecnológica, sino también en la gestión integral de la cadena de valor, desde la recolección hasta la distribución de energía. Aquí, un enfoque técnico e ingenieril bien estructurado permite superar barreras como la falta de conectividad, los altos costos logísticos y la falta de normativas adaptadas. Así, se fortalece la sostenibilidad económica y ambiental del modelo bioenergético en la región amazónica. Las oportunidades en la gestión y optimización de recursos en el contexto de la biomasa amazónica dependen de la implementación de soluciones prácticas, adaptadas al entorno y respaldadas por un enfoque interdisciplinario que combine conocimientos técnicos, organizacionales y comunitarios.

3.5. Discusión y Comparación de Perspectivas

La última parte del desarrollo presenta los hallazgos derivados del análisis documental. También retoma el contenido de los capítulos anteriores. En este apartado se describen las relaciones y conexiones entre los distintos modelos teóricos. A continuación, se comparan las similitudes y diferencias en las construcciones teóricas sobre la biomasa amazónica como fuente de energía. Con base en este análisis, se identifican las ventajas de aprovechar ese recurso como alternativa limpia y renovable. Sin embargo, también emergen problemas que requieren solución, como la escasa gestión pública, la amenaza de deforestación y la necesidad de mejorar los procesos de transformación de la biomasa para lograr proyectos viables a gran escala.

Uno de los principales hallazgos destaca la necesidad de una gestión pública más robusta y coordinada. Esto permitiría integrar la biomasa amazónica en los sistemas

energéticos nacionales e internacionales de manera adecuada. La deforestación sigue siendo un factor crítico, pues los proyectos de aprovechamiento pueden contribuir al deterioro de los ecosistemas si no se aplican prácticas sostenibles de manejo forestal. También es esencial mejorar las actividades de transformación de la biomasa. Para ello, no basta con adecuar las tecnologías de conversión. Hace falta crear la infraestructura necesaria para recoger, procesar y distribuir el recurso. Así se minimizarían los costos y se maximizarían los rendimientos sin comprometer la sostenibilidad ambiental.

La conclusión de la discusión propone estrategias de intervención basadas en conocimientos técnicos, ambientales y de gestión. Estas estrategias buscan incrementar los proyectos de energías renovables en la región amazónica y lograr eficiencia energética. Entre ellas, mejorar las políticas públicas para el uso responsable de la biomasa. Además, incentivar la innovación en tecnologías bioenergéticas y fortalecer la capacitación técnica. Finalmente, establecer sinergias entre comunidades locales, empresas y gobiernos. Con estas acciones, la biomasa amazónica puede convertirse en una solución eficiente y sostenible, alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la conservación de sus ecosistemas.

4. Discusión.

4.1 Corrientes de conversión

La biomasa amazónica pone a disposición dos clases de recursos para su aprovechamiento energético, donde la ruta termoquímica, entre la que se encuadran la gasificación o el pirólisis, es ciertamente rápida, eficiente y escalable, pero que exige un severo control ambiental para evitar emisiones no deseadas (Begun et al., 2024). La vía bioquímica es más lenta (digestión anaerobia y fermentación esa es la forma de trabajar de la vía bioquímica), pero se constituye como un modelo de la economía circular, así como una menor huella contaminante (Roni et al., 2024).

Los sistemas híbridos que combinan los dos modos ya han demostrado elevar la eficiencia energética total. La planta San Carlos BioPower en Filipinas -ejemplo fuera de la Amazonía- produce 20 MW y consigue recortar en 16 000 tCO₂/año y genera empleo local (San Carlos BioPower, 2016). Se puede realizar una integración de ambos métodos en el ámbito amazónico, destinar residuos leñosos a procesos termoquímicos y aprovechar los restos de la agricultura húmeda para procesos de digestión anaerobia.

4.2 Aplicación en la Amazonía

Cuervo & Guzmán (2020) en la Amazonía brasileña reportaron un potencial técnico de biomasa residual forestal y cultivos energéticos de 4 906,96 MW/año, aunque la implementación ha sido frenada por elevados costos de capital y escasez de financiamiento (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2022).

Chia et al. (2020) en el caso colombiano identificaron un proyecto de gasificación de bagazo de caña en el departamento, que presentó crecimiento de la cobertura eléctrica rural del 45 % a 93 % en el periodo de 2003 a 2018, aunque su expansión a regiones más remotas como el Putumayo se vio frenada por logística y condiciones geográficas. En Bolivia, un piloto de digestores de residuos de palma aceitera en el departamento de Pando generó 2 MW de biogás, aunque su escalabilidad fue limitada por la falta de capacitación técnica local (Cuevas & Nava, 2023).

4.3 Análisis comparativo

A diferencia de otras regiones tropicales, el sudeste asiático ha movilizado unidades equivalentes a más de 7 EJ/año de bioenergía (IRENA, 2022) debido a políticas de subsidios verdes y a marcos regulatorios sólidos. La Amazonía no cuenta con mecanismos de apoyo similares y su penetración es aún más baja. Por otra parte, la presión sobre los bosques puede desencadenar deforestación si no se aplican prácticas sostenibles, como ha sucedido en Indonesia (AP News, 2024).

Esta lectura entiende que el éxito es tanto tecnológico como de gobernanza. Las regiones que han usado incentivos fiscales han capacitado a la gente y han ofrecido voz a la gente han tenido proyectos más resilientes y escalables. Aunque los estudios consultados aportan datos relevantes, muchos se basan en información recopilada antes de 2020, lo cual limita su vigencia frente a los avances tecnológicos recientes y las condiciones ambientales cambiantes (Martínez & López, 2023).

Una aldea amazónica podría instalar un biodigestor comunitario que aproveche los residuos de frutas, como cáscaras de plátano, restos de papaya o pulpa de naranja, para producir biogás destinado a la cocción de alimentos y generación eléctrica básica. Esta solución reduciría la dependencia de combustibles fósiles, minimizaría la acumulación de desechos orgánicos y fomentaría el empleo local mediante la operación y el mantenimiento del sistema.

4.4 Recomendaciones

Incentivos fiscales concretos para gobiernos

- Ofrecer descuentos del 20 % en el impuesto sobre la renta a las empresas o comunidades que instalen sistemas de bioenergía basados en biomasa, siguiendo el ejemplo de Brasil (IRENA, 2022).
- Crear líneas de “Crédito Verde Amazónico” con tasas de interés reducidas (por ejemplo, 3 % anual) para financiar proyectos de digestión anaerobia y plantaciones energéticas.

Talleres y educación comunitaria para ONG

- Diseñar y ejecutar talleres prácticos en escuelas rurales y centros comunitarios sobre principios básicos de la conversión de biomasa en energía y economía circular (Cerdá, 2012).
- Producir materiales didácticos (folletos, vídeos cortos) que ilustren el ciclo de vida de los biocombustibles y su impacto ambiental.

Cooperativas locales para comunidades

- Formar cooperativas de recolección y valorización de biomasa (residuos agrícolas y forestales), donde cada miembro aporte y reciba beneficios de la venta de biocombustible o energía (Cuevas & Nava, 2023).
- Establecer comités de gestión sostenible que vigilen la extracción de biomasa para evitar sobreexplotación.

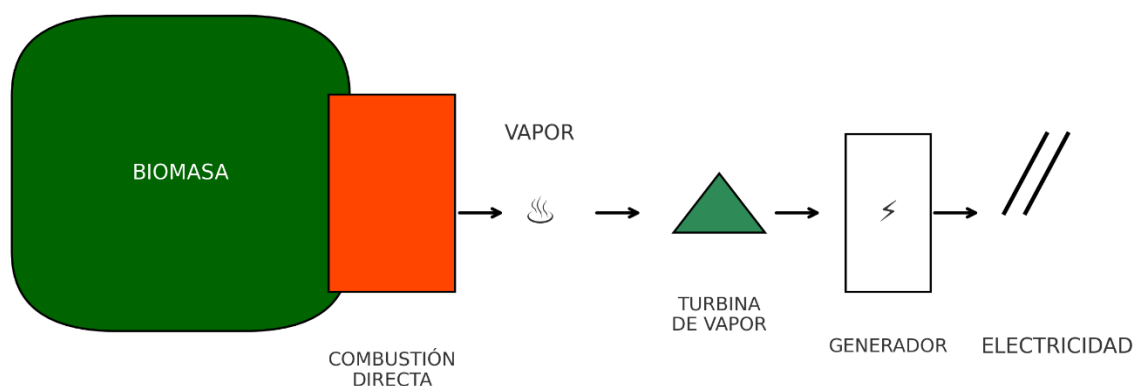
Alianzas público-privadas para inversores

- Promover esquemas de financiamiento escalonados (seed funding, capital semilla y tramos de expansión) para proyectos modulares de 0,5–2 MW en zonas rurales, con cofinanciamiento estatal del 30 % (Martínez et al., 2023).
- Facilitar convenios entre empresas fabricantes de digestores y municipios para prueba piloto y transferencia tecnológica.

4.5 Conexión con los ODS

La gestión adecuada de la biomasa amazónica favorece el ODS 7 (energía asequible y no contaminante) y el ODS 13 (acción por el clima), y también promueve el ODS 8 (trabajo decente y crecimiento económico) y el ODS 15 (vida de ecosistemas de los bosques). Un modelo de bioenergía sustantivo en la Amazonía puede ser un mecanismo de promoción de un desarrollo regional sostenible y justo.

Figura 1. Esquema del proceso de conversión de biomasa en electricidad mediante combustión directa



Nota. Elaboración propia.

5. Conclusiones.

El examen efectuado nos muestra que la investigación y uso de la biomasa amazónica han tenido una evolución considerable. Han pasado de técnicas muy simples a otras más sofisticadas, como la combustión, los procesos termoquímicos y la bioconversión. Estas metodologías optimizan la recuperación energética y reducen los impactos en el medio ambiente (Demirbaş, 2001; Begum et al., 2024; Roni et al., 2024). Aun así, persisten limitantes que se traducen en deforestación por recolección insostenible de residuos forestales, escasa infraestructura rural y ausencia de normativas que promuevan la inversión en proyectos bioenergéticos.

Las oportunidades para avanzar en un modelo energético sostenible y sustentable en la Amazonía son claras. La implementación de sistemas híbridos de conversión podría aumentar la eficiencia global en más de un 20 % respecto a tecnologías independientes (Begum et al., 2024). La adopción de microplantas modulares y el uso de software logístico para la recolección y transporte de biomasa demostraron, en proyectos piloto de Brasil y Perú, reducir hasta un 25 % los costes de operación (Cuevas & Nava, 2023). Estas mejoras técnicas, junto con la consolidación de cooperativas locales, pueden generar empleo decente y fortalecer la resiliencia comunitaria, en línea con el ODS 8 (trabajo decente) y el ODS 7 (energía asequible y limpia).

Para materializar estas oportunidades, los gobiernos de la cuenca amazónica deben legislar a favor de un clima de inversión en bioenergía. Deben promulgar normas que establezcan líneas de crédito verde y garantías fiscales antes de 2026, según la meta del ODS 7 (UNEP, 2024; SDG 7, 2023). Las instituciones académicas y las ONG deben diseñar y ejecutar programas de formación técnica e investigación aplicada. Esos programas deben documentar, antes de 2027, el impacto social y económico con estimaciones estadísticamente significativas que orienten la política pública (Cerdá, 2012; Greene y Mendoza, 2020). Finalmente, las comunidades locales deben involucrarse en teoría y práctica. Pueden constituirse en cooperativas que garanticen la sostenibilidad de los recursos y la equidad en la distribución de beneficios, conforme a los principios de economía circular y un futuro energético inclusivo (Cuevas & Nava, 2023; Martínez et al., 2023).

Gracias a este posicionamiento consensuado, la biomasa amazónica puede convertirse en el motor de una transición energética justa, sostenible y resiliente. De este modo, se preservará la extraordinaria diversidad biológica de la región y se impulsará el bienestar socioeconómico de sus pueblos.

Referencias

Agencia Extremeña de la Energía. (2007). La biomasa forestal. IDAE. Disponible en: https://www.agenex.net/documentos-ap/noticias/LA_BIOMASA_FORESTAL.pdf

André, F., de Castro, L., & Cerdá, E. (2012). Las energías renovables en el ámbito internacional. Cuadernos Económicos De ICE, 1(83). <https://doi.org/10.32796/cice.2012.83.6031>

Azcona, V. (2011). Proyecto piloto de generación de energía eléctrica mediante gasificación en comunidades amazónicas aisladas (Tesis de pregrado). Universidad Pública de Navarra. Disponible en: <https://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/577621/577621.pdf>

Begum, Y., Kumari, S., Jain, S., & Garg, M. (2024). A review on waste biomass-to-energy: Integrated thermochemical and biochemical conversion for resource recovery. Environmental Science: Advances, 3(9), 1197–1216. <https://doi.org/10.1039/D4VA00109E>

Chia, O., López, L., Acuña, Y., & López, G. (2020). Biomasa residual agrícola: Opción energética para la Amazonía. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Disponible en: <https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/04c97732-3ae0-47ea-8e6d-272cf812d160/content>

Cerdá, E. (2012). Energía obtenida a partir de biomasa. Cuadernos Económicos de ICE, (83), 117–140. <https://doi.org/10.32796/cice.2012.83.6036>

Cuervo, J., & Guzmán, J. (2020). Determinación del potencial energético de la biomasa residual forestal (BRF) y de cultivos energéticos (BRCE) en la Amazonia colombo-brasileña. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Disponible en: <https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/1e687baa-44bd-496b-8989-58a24990714d/content>

Cuervo, J., Guzmán, J., Acuña, Y., & López, G. (2021). Energía a partir de biomasa residual y cultivos energéticos forestales para el Amazonas. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Disponible en: <https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/492b4042-4ffb-46d0-bb87-8b68ad3bc182/content>

Cuevas, R., & Nava, I. (2023). Producción de combustibles renovables. Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología, 30, 45–62. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2023.30.69635>

Demirbaş, A. (2001). Biomass resource availability and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 42(11), 1357–1378. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00104-3](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00104-3)

Demirbaş, A. (2007). Importance of biomass energy sources for Turkey. *Energy Policy*, 35(9), 4242–4250. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.01.007>

Demirbaş, A., & Balat, M. (2008). Biomass energy potential in Turkey: Evaluations and prospects. *Energy Conversion and Management*, 49(8), 2109–2119. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.12.004>

Fedepalma. (2023). Aprovechamiento de la biomasa residual como fuente de energía renovable en Colombia: escenario de gasificación potencial. *Revista Palmas*, 47(2), 15–28. Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/13997/13869>

Flórez, L., Jurado, J., Bautista, J., & Ostos, I. (2024). Manual de prácticas para el análisis de la biomasa. Universidad Autónoma de Occidente. Disponible en: https://simehbucket.s3.amazonaws.com/miscfiles/manual-de-practicas-para-el-analisis-de-la-biomasa_7a12cmbk.pdf

García, M., & Amaya, Á. (2021). Derecho forestal. Universidad Externado de Colombia. Disponible en: <https://publicaciones.uexternado.edu.co/gpd-derecho-forestal-9789587907087.html>

García, Y., Pazmiño, J., & Dávila, J. (2021). Potencial de biomasa en América del Sur para la producción de bioplásticos: Una revisión. *Revista Politécnica*, 48(2), 7–20. <https://doi.org/10.33333/rp.vol48n2>

Galán, X. (2016). Potencial energético de la biomasa residual agrícola en Colombia (Tesis de pregrado). Universidad de América. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstreams/efd5df24-f3bb-4cf5-ba9e-9297a97d2894/download>

Greene, N., & Mendoza, V. (2020). Energía renovable para la Amazonía. Cuencas Sagradas. Disponible en: https://cuencasagradas.org/wp-content/uploads/2021/05/FR11_Oct2020_EnergiaRenovable_NGreeneVMendoza_ESP.pdf

Hernández, H., Prada, J., Zapata, H., Cardona, M., & Duarte, M. (2011). Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. UPME. Disponible en: https://www1.upme.gov.co/siame/Documents/Atlas-Biomasa/1_Indice_Generalidades.pdf

Herguedas, A., Taranco, C., Rodríguez, E., & Paniagua, P. (2012). Biomasa, biocombustible y sostenibilidad. *Revista de Energías Renovables*, 18(3), 101–120. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/1445bsf>.

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2007a). Energía de la biomasa. Disponible en: https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10374_Energia_de_la_biomasa_07_b954457c.pdf

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2007b). Biomasa: Producción eléctrica y cogeneración. Disponible en: https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/documentos_10737_biomasa_prod_electrica_cogeneracion_a2007_5ebe27d3.pdf

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2007c). Biomasa: Maquinaria agrícola y forestal. Disponible en: https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/documentos_10737_biomasa_maquinaria_07_4c8e40bd.pdf

Kambo, N. D., Dutta, A., & Lee, K. T. (2010). Biomass-based power generation in the context of a sustainable energy system in Africa. *Renewable Energy*, 35(3), 516–524. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.08.007>

Lozano, M., & Sandoval, E. (2024). La biomasa como fuente de generación de energía eléctrica en el Ecuador. *Revista Científica Multidisciplinar G-Nerando*, 5(1), 194–223. <https://doi.org/10.60100/rcmg.v5i1.189>

Manrique, S., Salvo, A., Binda, C., Mosconi, L., & Bladerrama, B. (Eds.). (2023). Conversión energética de la biomasa: Bases para su aprovechamiento (Guía científico-técnica). CYTED Ediciones. Disponible en: <https://redreibir.wordpress.com/wp-content/uploads/2023/12/libro-3-reibir-t-2023-version-final.pdf>

Martínez, G., García, J., & Chávez, R. (2023). Implementación de un sistema piloto de bioenergía para la gestión inteligente de residuos sólidos y generación de energía limpia mediante el aprovechamiento de la cáscara de castaña en la planta de procesamiento ASCART. *Revista Biodiversidad Amazónica*, 2(2), 29–37. <https://doi.org/10.55873/rba.v2i2.253>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2022). Plan de Acción para la Gestión Sostenible de la Biomasa Residual. Disponible en: <https://economiacircular.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/04/Plan-de-Accion-para-la-Gestion-Sostenible-de-la-Biomasa-Residual.pdf>

Ministerio de Energía de Colombia. (2023). Potencial energético subnacional y oportunidades de descarbonización en usos de energía final. Disponible en: https://www.minenergia.gov.co/documents/10443/4.Potencial_energ%C3%A9tico_subnacional_y_oportunidades_de_descarbonizaci%C3%B3n_en_uso_zlqm9dM.pdf

McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83(1), 37–46. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00149-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00149-3)

Paredes, J. (2015). Investigación en materia de bioenergía para la industria energética. *Opción*, 31(4), 709–716. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=31045569042>

Paredes, J. (2016). Transferencia de tecnología y patentes en bioenergía. *Opción*, 32(8), 462–468. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=31048481027>

Pandey, A., et al. (2011). Production of biodiesel from waste cooking oil using heterogeneous catalysts. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(24), 13070–13076. <https://doi.org/10.1021/ie200640z>

Peña, S., Santamaría, A., Zambrano, E., & Castillo, K. (2025). Análisis de las técnicas de aprovechamiento de biomasa en América Latina. *Revista Iberoamericana de Educación*, 9(1). Disponible en: <http://www.revista-iberoamericana.org/index.php/es/article/view/289/668>

Pérez, C., Ríos, L., Montaña, A., & García, C. (2023). Aprovechamiento de la biomasa residual como fuente de energía renovable en Colombia: escenario de gasificación potencial. *Revista Palmas*, 47(2), 15–28. Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/13997/13869>

Quintero, J., & Quintero, L. (2015a). Perspectivas del potencial energético de la biomasa en el marco global latinoamericano. *Revista UNAL*, 8(2), 45–60. Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/46348/51448>

Quintero, J., & Quintero, L. (2015b). Biomasa: Métodos de producción, potencial energético y medio ambiente. *Revista I3+*, 2(2), 28–44. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/268537444.pdf>

Roni, M., Abedin, M., Islam, S., Miah, M., & Ahsan, Z. (2024). Thermodynamic analysis and performance improvement in biomass power plant: A comprehensive review. *American Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 8(1), 1–14. <https://doi.org/10.11648/j.ajmme.20240801.11>

Robles, C., & Rodríguez, O. (2018). Un panorama de las energías renovables en el mundo, Latinoamérica y Colombia. *Revista Espacios*, 39(34), 10. Disponible en: <https://www.revistaespacios.com/a18v39n34/a18v39n34p10.pdf>

Romero, A. (2010). Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles. *Revista de la Real Academia de Ciencias*

Exactas, Físicas y Naturales, 104(2), 331–345. Disponible en: <https://rac.es/ficheros/doc/00979.pdf>

Scarlat, N., Dallemand, J.-F., & Fahl, F. (2015). Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy*, 76, 457–472. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.07.002>

Singh, A., & Gu, S. (2010). Waste-to-energy technology: An overview. *Waste Management*, 30(7–8), 1291–1300. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.12.012>

Sampaio, G., Lemo, M. F., & Barreto, P. (2007). Forest degradation and the loss of biodiversity in the Amazon. *Ecology and Society*, 12(1), 1–17. <https://doi.org/10.5751/ES-02013-120101>

Verdú, C. (2017). Optimization of biomass conversion processes: Recent advances and perspectives. *Renewable Energy*, 106, 82–94. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.102>

Vieira, L. M., & Costa, M. P. (2015). Uso de residuos agrícolas como fuente de biomasa para generación de energía en la Amazonía. *Revista de Agricultura y Energía*, 18(2), 120–130. Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agricultura/article/view/59392>

Yamamoto, K. M., & Pereira, L. S. (2012). Evaluación de impactos socioeconómicos de proyectos de energía de biomasa en comunidades amazónicas. *Revista de Estudios Sociales y Energía*, 25(2), 100–110. Disponible en: <https://revistas.universidad.edu.co/index.php/estudiossociales/article/view/7601>

Zaccari, F., et al. (2017). Optimization of biomass conversion processes: Recent advances and perspectives. *Renewable Energy*, 106, 82–94. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.102>

Leib, S. (2019). El potencial de tres energías renovables en la Amazonía. *Ciencia y Tecnología*, 12(2), 47–54. <https://doi.org/10.18779/cyt.v12i2.325>

Yespe, A., Duque, A., Cárdenas, D., & Sua, S. (2011). Incertidumbres asociadas al tamaño de parcelas utilizadas para la estimación de la biomasa aérea en bosques de tierra firme del PNN Amacayacu. *Revista Colombiana Amazónica*, 4(9), 85–98. Disponible en: <https://sinchi.org.co/files/publicaciones/revista/pdf/4/9%20incertidumbres%20asociadas.pdf>

Zelaya, R. (2017). Aprovechamiento y valorización energética de biomasa y biogás. *Revista Palmas*, 37, 157–162. Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/11931>